

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS



**Efecto de un empaque activo biobasado (Polysuccinimida-
Microcelulosa) en la conservación de carne de pollo.**

POR

Hannaely Islas Hernández

T E S I S

Presentada como requisito parcial para obtener el título profesional de

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Noviembre de 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos

**Efecto de un empaque activo biobasado (Polysuccinimida-Microcelulosa) en la
conservación de carne de pollo.**

T E S I S

Presentada por

HANNAELY ISLAS HERNÁNDEZ

y que somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para
obtener el título profesional de

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

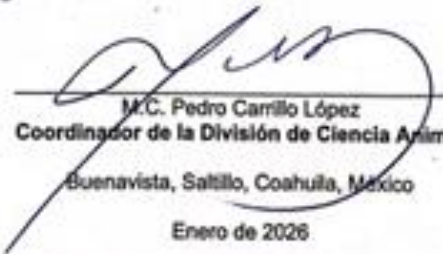
La cual fue revisada y aprobada por el comité de asesoría:


Dra. María Hernández González
Asesor Principal


Dra. Ana Margarita Rodríguez Hernández
Co-Asesor Externo


Dra. Haydee Yajaira López De la Peña
Co-Asesor


Dr. Francisco Hernández Centeno
Co-Asesor


M.C. Pedro Camillo López
Coordinador de la División de Ciencia Animal
Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Enero de 2026



Declaración de no plagio

Declaración de no plagio. El autor, quien es responsable directo, jura bajo protesta de decir la verdad, que se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos: Reducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o el autor original (copiado y pegado); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestado los datos o la tesis para presentarla como copia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin comillas; utilizar material digital como imágenes, vídeos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o la fuente. En este sentido, lo anterior puede ser confirmado por el lector, estando consciente de que, en caso de comprobarse plagio en el texto, no respetar los derechos de autor, edición o modificación, será sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizó de las consecuencias generadas en caso de existir cualquier tipo de plagio y declaró que este trabajo es original.



Hannaely Islas Hernandez

DEDICATORIAS

A mis padres **Alfredo Islas Romano y Floricel Hernandez Muñoz**, porque todo este logro es gracias a todo el apoyo que me dieron

A mi mamá **Floricel Hernandez Muñoz** por todo su amor, y apoyo incondicionalmente, y aunque la distancia nos separaba siempre estaba presente, por las veces que me dijo que era capaz de todo, cuando yo sentía que ya no podía seguir adelante, que gracias a ti llegue a este punto, por enseñarme que en nuestra familia rendirse no es una opción.

A mi papá **Alfredo Islas Romano** por todas enseñanzas que me ha dado por que gracias a ti soy la mujer que soy, gracias por hacerme fuerte y darme las herramientas que iba a ocupar en este largo camino lejos de casa, por todo el sacrificio que haces por mí, gracias por darme ese aliento en los momentos que más lo necesitaba, por todo tu apoyo incondicional.

A mis hermanos **Jade Islas Hernandez e Isaías Islas Hernandez**, por darme esas fuerzas que necesitaba para terminar este camino, por ser una fuente constante de apoyo, motivación y fortaleza a lo largo de mi formación académica. Su compañía, comprensión y aliento han sido fundamentales, este título también es de ustedes.

A mi abuelita **Crispina Muñoz Sánchez**, gracias por siempre estar con un consejo en el momento que más lo necesitaba, por estar al pendiente de mí en todo momento y por recibirme con un abrazo cuando regresaba a casa

A mi abuelita **Antonia Romano** que, aunque no estuvo presente, sé que me acompañó en cada paso importante desde el cielo.

A mis tías **Mary, Irma, Ibi, Melis, Vero, Selene, Ana**, a mi Tío **Toño** y mis primas **Daf, Lore, Mariana**, por siempre estar con una palabra de aliento y apoyándome cuando lo necesitaba

AGRADECIMIENTOS

A Dios por acompañarme en todo momento y nunca dejarme sola, por levantarme en los momentos difíciles y darme la fortaleza necesaria.

A mis padres, hermanos y familia por darme por todo su apoyo en cada momento de esta etapa.

Agradezco a el Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos por abrirme sus puertas y por todas las enseñanzas que me dejó.

A la Dra. María Hernandez Gonzales Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi asesora de tesis, por su valiosa orientación, acompañamiento constante y disposición a lo largo del desarrollo de este trabajo de investigación. Su experiencia, conocimientos y observaciones oportunas fueron fundamentales para el fortalecimiento del contenido científico y la correcta estructuración del presente estudio.

A la Dra. Haydee Yajaira López de la Peña y al Dr. Francisco Centeno por el apoyo académico que me brindaron para lograr este proyecto, agradezco todo lo aprendido

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por abrirme las puertas y permitirme desarrollar mis conocimientos en sus instalaciones

A María Jose Flores Campos por apoyarme en todo momento, con las dudas y cada inconveniente que se presentaba durante este proyecto.

A mi Adriancito por ser mi fortaleza durante esta etapa de mi vida, por siempre apoyarme y nunca dejarme sola, este título también es tuyo porque nunca dejaste que me rindiera y me diste los ánimos para poder terminar.

A mis amigos Alondra García, Edwin Ismael, Ana Karen Vara, Fernando Parra, Camila García, Rosa Isela Chávez que fueron mi familia foránea, gracias por estar presentes en cada etapa de este camino, por su apoyo incondicional, su paciencia y sus palabras de ánimo cuando más las necesité. Su amistad fue un refugio en los momentos de cansancio y una motivación constante para seguir adelante. Este

logro no habría sido el mismo sin ustedes, quienes hicieron este proceso más llevadero y significativo.

A Itzel perez y a todas las personas que estuvieron acompañándome en este camino, gracias por ese consejo, palabra que me dieron en algún momento.

CONTENIDO	
Dedicatorias	1
Agradecimientos	3
Indice de figuras.....	9
Indice de tablas.....	10
1. Introducción	1
2. Justificación	5
3. Hipótesis	8
4. Objetivos	9
4.1 Objetivo general	9
4.2 Objetivos específicos	9
5. Revisión de literatura	11
5.1 Empaque	11
5.1.1 Definición de empaque	11
5.1.2 Clasificación de los empaques	12
5.2 Empaques tradicionales	12
5.2.1 Ventajas	13
5.2.2 Desventajas	13
5.3 Empaques biobasados	14
5.3.1 Ventajas	15
5.3.2 Desventajas	16
5.4 Biomateriales	16
5.4.1 Usos e importancia	17
5.4.2 Ventajas	18
5.4.3 Desventajas	19
5.5 Tipos de biomateriales	19
5.5.1 Almidón	20
5.5.2 Celulosa	21
5.5.3 Polisuccinimida	22
5.6 Biocompuestos	22
5.6.1 Estructura y funcionamiento	23
5.6.1.1 Matriz polimérica	23
5.6.1.2 Reforzantes naturales	24
5.6.1.3 Aditivos funcionales	24

5.7 Tendencias en envasado	25
5.7.1 Empacado inteligente	26
5.7.2 Empacado activo	27
5.8 Conservación de productos cárnicos	28
5.8.1 Técnicas de conservación	29
5.9 Carne de pollo	31
5.9.1 Demanda y consumo	31
5.9.2 Tasa de crecimiento rápida	32
5.9.3 Peligros y agentes de deterioro	33
5.9.4 Almacenamiento, transporte y envasado	34
6. Materiales y métodos	34
6.1 Obtención de materiales base	34
6.2 Elaboración de empaques	37
6.3 Caracterización de los materiales	40
6.4 Evaluación de la actividad antimicrobiana	44
7. Resultados y discusión	50
8. Conclusiones	62
9. Referencias	64

INDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Proceso para la obtención de PSI (Elaboración propia).....	39
Ilustración 2: Sistema de recirculación (Elaboración propia).....	41
Ilustración 3: Estufa de secado para MCA (Elaboración propia).....	41
Ilustración 4: FTIR POLISUCCIDIMIDA (ilustración propia).....	50
Ilustración 5: FTIR MICROCELULOSA (Ilustración propia)	50
Ilustración 6: FTIR AEO (Ilustración propia)	51
Ilustración 7: FTIR ALMIDON (Ilustración propia)	52
Ilustración 8: FTIR TA (Ilustracion propia).....	53
Ilustración 9: FTIR TB (Ilustracion propia).....	54
Ilustración 10: FTIR TC (Ilustracion propia)	55
Ilustración 11: FTIR TD (Ilustracion propia)	56

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tratamientos de empaques.....	42
Tabla 2: Atributos de color de pechuga de pollo almacenada aerobicamente a 4 °C en envases biodegradables a base de polisuccinimida.....	59
Tabla 3: Humedad (%) de la pechuga de pollo almacenada aerobicamente a 4 °C en envases biodegradables a base de polisuccinimida.	62
Tabla 4: Propiedades antibacterianas de los envases a base de polisuccinimida.	65
Tabla 5: Analisis microbiologico (Log10 UFC/g) de pechuga de pollo almacenada aerobicamente a 4 °C en envases biodegradables a base de polisuccinimida.....	67

RESÚMEN

La búsqueda de alternativas de empaque que, además de ser biodegradables, contribuyan activamente a la preservación de la calidad alimentaria ha impulsado el desarrollo de materiales funcionales para carne fresca. En este estudio se elaboraron bioempaques activos a base de polisuccinimida (PSI), preparada según la metodología de Benet (2005); microcelulosa nativa y microcelulosa acetilada, obtenidas conforme a Isidro (2019); aceite esencial de orégano (AEO), extraído por arrastre de vapor; y almidón comercial de maíz. Los materiales fueron desarrollados en el Laboratorio de Inocuidad y Empaques de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Apartir de los materiales bases se llevaron a cabo procesos de extrusión en un extruder de tornillo sin fin, para su posterior proceso de termoconformado en una termformadora de placa. Los empaques fueron caracterizados químicamente mediante FTIR con la finalidad de corroborar la presencia de los grupos funcionales presentes en los materiales base y su correcta interacción para la formación de los biocompósitos. Los empaques se evaluaron en carne de pollo almacenada durante siete días a 4 °C, considerando tratamientos con microcelulosa nativa (T1) o acetilada (T2), ambos funcionalizados con AEO, así como controles sin agente activo (T3 y T4).

Los resultados mostraron que los tratamientos con AEO (T1 y T2) preservaron de manera significativa la humedad del producto. En el día 7, los valores de humedad fueron de **64.26% (T1)** y **65.67% (T2)**, en contraste con **63.52% (T3)** y **63.46% (T4)** ($p < 0.05$), evidenciando un efecto protector del agente activo. En los atributos de color, T2 presentó la mayor estabilidad: su luminosidad (L^*) disminuyó de 62.47 a 56.39 unidades, mientras que T3 descendió hasta 50.47 unidades al día 7. Para el parámetro b^* , los tratamientos sin AEO mostraron el mayor amarillamiento (T4: 28.55), mientras que T2 mostró un incremento más moderado (25.45), indicando menor oxidación superficial.

En la actividad antimicrobiana in vitro, únicamente los tratamientos con AEO mostraron halos de inhibición: **20.0 mm (T1)** y **21.6 mm (T2)** frente a *S. aureus*; **15.6 mm (T1)** y **15.0 mm (T2)** frente a *B. subtilis*; y **7.5 mm** contra *E. coli* en ambos

casos, mientras que T3 y T4 no mostraron actividad (N/A). El análisis microbiológico en la carne confirmó estos efectos: al día 7, los mesófilos aerobios totales alcanzaron **9.36 Log CFU/g (T1)** y **9.42 Log CFU/g (T2)**, significativamente menores que los controles **9.63 Log (T3)** y **9.72 Log (T4)** ($p < 0.05$). Para *Staphylococcus aureus*, T1 y T2 registraron **8.48 y 8.52 Log**, respectivamente, mientras que los controles alcanzaron **8.75 y 8.79 Log**.

En conjunto, los resultados demuestran que los bioempaques funcionalizados con AEO mejoran la estabilidad fisicoquímica y microbiológica de la carne de pollo, y que el tratamiento con microcelulosa acetilada (T2) exhibe el mejor desempeño integral al preservar humedad, retardar cambios de color y reducir el crecimiento microbiano. Se concluye que la combinación de polisuccinimida, microcelulosa modificada y compuestos naturales antimicrobianos es una estrategia viable para el desarrollo de empaques activos y biodegradables orientados a la conservación de alimentos frescos.

1. INTRODUCCIÓN

La carne de pollo es una de las principales fuentes de proteína animal consumidas a nivel mundial debido a su alto valor nutricional, accesibilidad y versatilidad en la alimentación humana. Sin embargo, debido a su composición química y alto contenido de humedad, es altamente perecedera y susceptible a procesos de deterioro microbiológico y fisicoquímico. Estos procesos pueden comprometer la seguridad alimentaria y la calidad sensorial del producto, representando un desafío significativo para la industria cárnica (Pérez Arnedo, 2015). Por esta razón, la implementación de nuevas tecnologías de conservación es fundamental para prolongar la vida útil del producto y garantizar su inocuidad.

En los últimos años, los envases activos han emergido como una alternativa innovadora y eficaz en la preservación de alimentos perecederos. Estos envases están diseñados para interactuar con el producto envasado, liberando o absorbiendo sustancias con propiedades antimicrobianas y antioxidantes que ayudan a retardar el crecimiento de microorganismos patógenos y reducir las reacciones de oxidación de lípidos y proteínas (Palomino Romero, 2016). Investigaciones previas han demostrado que la incorporación de compuestos naturales, como aceites esenciales y extractos vegetales, en materiales de envasado puede mejorar la estabilidad microbiológica y fisicoquímica de la carne de pollo, proporcionando una alternativa sostenible a los métodos de conservación tradicionales (Reyes-Montaña et al., 2021).

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la conservación de los atributos fisicoquímicos y microbiológicos de la carne de pollo en envases activos. Se analizarán diferentes formulaciones de materiales de envasado y su efecto sobre parámetros como la capacidad de retención de agua, la variación en coloración y la carga microbiológica durante el almacenamiento. Los resultados obtenidos contribuirán al desarrollo de estrategias más eficientes y seguras para la conservación de carne de pollo, alineándose con la demanda del mercado por productos cárnicos con mayor vida útil y menor uso de conservantes artificiales.

Esta investigación se sustenta en estudios previos que han demostrado la eficacia de los envases activos en la reducción del deterioro microbiológico y fisicoquímico de productos cárnicos. Por ejemplo, en un estudio realizado por Pérez Arnedo (2015), se identificaron los principales microorganismos responsables del deterioro de la carne de pollo, como *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes* y *Campylobacter* spp., lo que resalta la importancia de estrategias de conservación innovadoras. Asimismo, Palomino Romero (2016) evaluó el efecto de aceites esenciales de orégano y perejil en la carne de cuy empacada al vacío, encontrando una significativa reducción en la proliferación bacteriana. Estos antecedentes justifican la importancia del presente estudio en la búsqueda de soluciones efectivas para la conservación de la carne de pollo.

2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, el crecimiento constante de la población ha incrementado de manera significativa la demanda de alimentos, lo que no solo implica mayores niveles de producción, sino también la necesidad de desarrollar métodos eficientes para su conservación y protección. En este contexto, los empaques alimentarios desempeñan un papel fundamental; sin embargo, muchos de los materiales utilizados actualmente provienen de derivados del petróleo, lo que genera un impacto ambiental negativo debido a la acumulación excesiva de residuos y su limitada degradación en el ambiente.

Ante esta problemática, en los últimos años ha surgido un creciente interés por la investigación y desarrollo de materiales biodegradables que sean compatibles con los alimentos y que representen una alternativa sostenible a los empaques convencionales. Dentro de este enfoque, los empaques activos han cobrado especial relevancia, ya que no solo cumplen la función de contener el alimento, sino que además aportan propiedades funcionales, como la liberación controlada de sustancias benéficas que contribuyen a la conservación de la calidad e inocuidad del producto.

No obstante, uno de los principales retos asociados al uso de biopolímeros y biomateriales en empaques es la limitada resistencia mecánica que suelen presentar. Para superar esta limitante, se han desarrollado biocompuestos reforzados con fibras de origen natural provenientes de diversas fuentes, entre las cuales destaca el Agave de lechuguilla Torr., debido a su disponibilidad y a las propiedades mecánicas que puede conferir a los materiales en los que se incorpora.

En este sentido, la presente investigación se orienta al establecimiento de las condiciones adecuadas para la modificación química de la microcelulosa obtenida a partir de fibras de lechuguilla, la cual ha demostrado, en estudios previos realizados por el grupo de trabajo, su capacidad para mejorar las

propiedades mecánicas de los empaques en los que se incorpora. Sin embargo, una de las desventajas observadas ha sido la tendencia al secado del producto

contenido, lo que hace necesario optimizar el tratamiento químico, específicamente mediante el proceso de acetilación, con el fin de reducir dicho efecto y mejorar el desempeño del material desarrollado.

3. HIPÓTESIS

H₀: El almacenamiento de carne de pollo en bioempaques de polisuccinimida reforzados con microcelulosa nativa o acetilada y funcionalizados con aceite esencial de orégano reducirá la pérdida de humedad, preservará los atributos de color y disminuirá el crecimiento microbiano.

H_a: El uso de bioempaques a base de polisuccinimida reforzados con microcelulosa nativa o acetilada y funcionalizados con aceite esencial de orégano no produce diferencias significativas en los atributos de calidad fisicoquímica (humedad, color) ni en los parámetros microbiológicos de la carne de pollo fresca durante el almacenamiento, en comparación con los empaques que no contienen el agente activo.

4. OBJETIVOS

4.1. General.

Desarrollar y evaluar bioempaques activos a base de polisuccinimida reforzados con microcelulosa nativa o acetilada y enriquecidos con aceite esencial de orégano, con el propósito de mejorar la estabilidad fisicoquímica y microbiológica de la carne de pollo durante su almacenamiento en refrigeración.

4.2. Específicos.

- Elaborar y caracterizar químicamente bioempaques elaborados a base de polisuccinimida reforzada con microcelulosa nativa y acetilada, funcionalizados con aceite esencial de orégano.
- Evaluar el efecto de los bioempaques activos en la conservación de la humedad de la carne de pollo en almacenamiento refrigerado.
- Analizar la influencia de los tratamientos en los parámetros de color (L, a, b*) de la carne de pollo almacenada en refrigeración.
- Determinar la actividad antimicrobiana de los bioempaques mediante pruebas de difusión en placa frente a microorganismos indicadores (*S. aureus*, *E. coli*, *B. subtilis*).
- Cuantificar el crecimiento microbiano (mesófilos aerobios totales y *Staphylococcus aureus*) en la carne de pollo almacenada en los distintos tratamientos.

5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Empaque

Un empaque puede definirse como la envoltura o cubierta de un producto el cual tiene el fin de protegerlo así como ayudar a facilitar su manejo y venta. De acuerdo con la **Organización Internacional de Normalización (ISO)**, el empaque tiene la función de asegurar la conservación del producto, facilitar su distribución y aportar la información necesaria para su identificación y comercialización (ISO 18601, 2013).

En este sentido, Paine (2012) señala que el empaque cumple un rol fundamental no solo como barrera física frente a factores ambientales, biológicos y químicos, sino también como un medio de comunicación que transmite información legal, de seguridad y de mercadotecnia al consumidor. Asimismo, se reconoce que los empaques se clasifican en primarios, secundarios y terciarios, de acuerdo con su nivel de contacto y su función en la cadena logística (Lockhart, 1997)

El concepto empaque con el paso del tiempo ha tenido que ir evolucionando e incorporando elementos que contribuyan a la sostenibilidad ambiental y a la innovación tecnológica, desarrollando así empaques biodegradables, reciclables, activos e inteligentes, los cuales son capaces de interactuar con el producto y al mismo tiempo con el consumidor. (CA Ortega Martinez Et. Al)

5.1.1 Empaques tradicionales

Los empaques tradicionales los cuales se elaboran principalmente a partir de materiales como plásticos derivados del petróleo, vidrio, metales y cartón, tiene diversas ventajas entre las cuales se encuentran las siguientes:

- Alta resistencia mecánica y capacidad de protección frente a factores externos (humedad, oxígeno, contaminantes).
- Amplia disponibilidad y bajo costo de producción en comparación con alternativas emergentes.
- Excelente versatilidad en formas, tamaños y aplicaciones.

Comentado [MHG1]: Se requiere una referencia para soportar esta aseveración

Comentado [MHG2]: Tratemos de hablar en tercera persona

- Durabilidad y larga vida útil en almacenamiento y transporte (Kumar et al., 2020).

Dentro de las desventajas se pueden señalar:

- Elevada dependencia de recursos fósiles en el caso de los plásticos convencionales.
- Baja biodegradabilidad y acumulación en el ambiente, contribuyendo a la contaminación.
- Dificultades en los procesos de reciclaje debido a la mezcla de materiales o aditivos.
- Impacto negativo en la huella de carbono y en la generación de residuos sólidos urbanos (Wuyts et al., 2021)

5.1.2 Empaques biobasados

los empaques que se producen a partir de materias primas renovables como almidón, celulosa, ácido poliláctico (PLA) proteínas vegetales o algún otro subproducto agrícola, se les conoce como empaques biobasados, los cuales pretenden mitigar los impactos ambientales al igual que tienen ciertas ventajas como son:

- Uso de recursos renovables en lugar de combustibles fósiles.
- Biodegradabilidad o compostabilidad en condiciones controladas, lo que contribuye a reducir residuos plásticos.
- Imagen positiva frente al consumidor, asociada a la sostenibilidad y la innovación.
- Posibilidad de integrar funcionalidades avanzadas como propiedades antimicrobianas o barreras activas (Siracusa et al., 2020).

A pesar de los múltiples beneficios que ofrecen los empaques biobasados, también presentan ciertas desventajas que limitan su aplicación masiva en la industria, ejemplos de algunas de ellas son:

- Costos de producción más elevados en comparación con los empaques tradicionales.
- Propiedades mecánicas y de barrera inferiores en ciertos biopolímeros (ej. menor resistencia a la humedad).
- Limitada infraestructura de compostaje o reciclaje en muchos países, lo que reduce su efectividad ambiental.
- Posible competencia con la producción de alimentos en el uso de materias primas agrícolas (Venkatesh et al., 2021).

5.2 Biomateriales usos e importancia

Los biomateriales son materiales de origen natural o sintético que se emplean para interactuar con sistemas biológicos, ya sea con fines médicos, industriales o ambientales. Su característica principal es que poseen biocompatibilidad, es decir, no generan efectos adversos significativos en los organismos vivos o en el medio ambiente (Ratner, 2019).

En los últimos años, los biomateriales han adquirido gran relevancia en áreas como la medicina regenerativa, la fabricación de empaques biodegradables, la liberación controlada de fármacos y la industria alimentaria, debido a su potencial para reemplazar materiales derivados del petróleo y contribuir a la sostenibilidad (Cheng et al., 2021).

5.2.1 Ventajas de su uso

El uso de biomateriales ha cobrado gran relevancia en los últimos años debido a las múltiples ventajas que ofrecen en comparación con materiales convencionales. Una de sus principales características es la biocompatibilidad, la cual permite su interacción con sistemas biológicos sin generar reacciones adversas significativas, lo que resulta esencial en aplicaciones médicas y en la industria alimentaria dado su contacto con los productos que contiene (Ratner et al., 2020). Asimismo, al provenir de fuentes renovables como polisacáridos, proteínas o subproductos agrícolas, los biomateriales contribuyen a reducir la dependencia de recursos fósiles

y favorecen la transición hacia modelos de economía circular (Venkatesh et al., 2021).

La biodegradabilidad que estos poseen es una de las ventajas que tienen ya que estos materiales tienen la condición de descomponerse en condiciones ambientales controladas, y logrando con esto evitar la acumulación de residuos así como mitigar el impacto ambiental que generan los empaques convencionales, los biomateriales permiten ser modificados para otorgarles propiedades específicas, como actividad antimicrobiana, capacidad antioxidante o barreras de protección frente a la humedad y el oxígeno, ampliando así sus posibles aplicaciones en el sector alimentario y biomédico.

Estas ventajas convierten a los biomateriales en una alternativa sostenible, innovadora y versátil, capaz de responder tanto a los desafíos ambientales como a las necesidades técnicas de la industria moderna.

Importancia Los biomateriales representan un campo de gran relevancia debido a su capacidad de interactuar con sistemas biológicos y ofrecer soluciones en

diversas áreas como lo son la medicina, la ingeniería, la sostenibilidad ambiental y el área de alimentos. En el ámbito alimenticio, los empaques son fundamentales para diferentes tipos de alimentos, ya que contribuyen en la mejora de la vida de anaquel, su color, sabor, aroma y textura. El cambiar los empaques tradicionales por empaques hechos de biomateriales contribuye a reducir el impacto ambiental que estos provocan y a desarrollar alimentos con una mejor calidad.

Esos materiales, en mayor parte son de origen renovable, tienen alternativas sostenibles frente a otros polímeros los cuales son derivados del petróleo, el uso de estos biomateriales disminuye el impacto negativo en los ecosistemas. Por ello, su importancia no solo radica en el campo de la salud, sino también en su potencial para transformar industrias hacia modelos más ecológicos y responsables con el medio ambiente. En conjunto, los biomateriales son esenciales porque integran innovación tecnológica, sostenibilidad y beneficios sociales, posicionándose como herramientas claves para enfrentar los retos actuales en salud y medio ambiente.

5.2.2 Desventajas de su uso

A pesar de sus múltiples beneficios, los biomateriales también presentan diversas limitaciones que dificultan su adopción a gran escala. Una de las principales desventajas radica en sus propiedades mecánicas reducidas, ya que algunos presentan baja resistencia al calor, la humedad o a esfuerzos físicos, lo que limita su aplicación en contextos que requieren alta durabilidad (Siracusa et al., 2020). Además, los procesos de extracción y síntesis de estos materiales pueden implicar un costo de producción elevado, lo cual los hace menos competitivos frente a los materiales convencionales derivados del petróleo (Zhao et al., 2021).

Otra problemática asociada es su vida útil reducida, puesto que su carácter biodegradable, aunque ambientalmente ventajoso, puede convertirse en un inconveniente en situaciones donde se necesita estabilidad prolongada, como en empaques de larga duración o dispositivos médicos permanentes (Ratner et al., 2020). Asimismo, en muchos países existe una infraestructura limitada para el compostaje y reciclaje de biomateriales, lo que reduce la efectividad de su potencial sostenible (Venkatesh et al., 2021).

La gran parte de la producción de biopolímeros son a partir de cultivos agrícolas lo que en algún momento podría generar una competencia con la seguridad alimentaria, ya que utilizando materias primas como maíz, caña o papa en la elaboración de materiales en lugar de a la alimentación humana, representando un impacto ético y económico.

En este sentido biomateriales, como el utilizado en la presente investigación no tendría un impacto en la alimentación humana ya que es una materia prima que se obtiene principalmente a partir de los residuos lignocelulósicos de la planta de agave, como las hojas o el bagazo que queda después de los procesos de extracción de jugo para tequila, mezcal u otros derivados. Este subproducto, que normalmente se considera un desecho agroindustrial, resulta muy rico en **celulosa, hemicelulosa y lignina**, lo que lo convierte en una fuente prometedora para producir micro y nanocelulosas.

5.3 Tipos de biomateriales

Los biomateriales pueden clasificarse de acuerdo a su origen y propiedades, en la actualidad tiene mayor relevancia aquellos que son derivados de polisacáridos y algunos polímeros sintéticos biodegradables ya que su compatibilidad y gran potencial podrían lograr sustituir a los materiales de origen petroquímico que se han usado durante años causando un notable impacto ambiental. Almidón

El almidón es un polisacárido natural compuesto por amilosa y amilopectina, extraído de fuentes como maíz y papa principalmente.

Su importancia como biomaterial radica en su abundancia, bajo costo y biodegradabilidad. Se ha utilizado ampliamente en la elaboración de bioplásticos, películas comestibles y recubrimientos para empaques alimentarios, además de matrices en liberación controlada de fármacos (Avérous, 2004). Sin embargo, su sensibilidad a la humedad y sus limitadas propiedades mecánicas requieren la combinación con otros polímeros o plastificantes para mejorar su desempeño.

5.3.1 Celulosa

Dentro de la gran cantidad de sustancias naturales que han sido de un valor significativo a lo largo de todo el desarrollo científico – tecnológico de la humanidad se destaca sin lugar a dudas la celulosa, considerada como uno de los polímeros naturales de mayor abundancia en la naturaleza, y que puede ser obtenida desde las más variadas fuentes entre las que se encuentran: todo tipo de cuerpos vegetales, en diferentes tipos de algas, de la actividad extracelular de múltiples tipos de microorganismos y en el caparazón o estructura de algunos animales marinos.

Polisuccinimida La polisuccinimida (PSI) es un polímero sintético biodegradable que se obtiene a partir de la polimerización térmica del ácido aspártico. Una de sus principales ventajas es que puede transformarse en poliaspártico, material con aplicaciones biomédicas y medioambientales. Entre sus usos destacan la elaboración de hidrogeles, sistemas de liberación de fármacos y materiales absorbentes para aplicaciones agrícolas e industriales (Mishra & Goel, 2018). Su

carácter biodegradable y sus propiedades de compatibilidad con sistemas acuosos la han posicionado como una alternativa atractiva frente a polímeros convencionales.

5.3.2 Biocompositos

Los **biocompósitos** son materiales compuestos formados por una **matriz polimérica de origen biológico** y un **reforzante natural**, generalmente lignocelulósico o nanocelulósico, cuyo propósito es mejorar propiedades mecánicas, térmicas y funcionales del material resultante. Debido a su naturaleza sostenible y su capacidad para integrar compuestos activos, los biocompósitos se han convertido en una alternativa relevante para la industria del empaque alimentario (Santos et al., 2021; Kumar & Sharma, 2023).

A diferencia de los polímeros sintéticos derivados del petróleo, los biocompósitos presentan ventajas como **biodegradabilidad**, reducción del impacto ambiental y compatibilidad con modelos de economía circular (Mohanty et al., 2020). En empaques activos, estas matrices permiten incorporar sustancias con actividad antimicrobiana o antioxidante, lo que incrementa la vida útil de alimentos y disminuye la dependencia de aditivos sintéticos (Fang et al., 2022; Nisar et al., 2021).

5.3.1.1 Estructura y funcionamiento

Un biocompósito incluye tres elementos fundamentales:

5.3.1.1.1 Matriz polimérica biobasada

La matriz actúa como fase continua y determina propiedades esenciales como la barrera, la biodegradabilidad y la capacidad para incorporar aditivos activos. Materiales como quitosano, almidón termoplástico, gelatina o PLA son ampliamente utilizados debido a su biocompatibilidad y procesabilidad (Santos et al., 2021; Mohanty et al., 2020).

5.3.1.1.2 Reforzantes naturales

Fibras lignocelulósicas, microcelulosa o nanocelulosa se emplean como refuerzos, mejorando significativamente la rigidez, resistencia mecánica y estabilidad térmica del material (Habibi, 2020; Espinoza-Acosta et al., 2021). La incorporación de refuerzos también puede reducir la permeabilidad al vapor de agua y optimizar la integridad estructural del empaque.

5.3.1.1.3 Aditivos funcionales (en empaques activos)

Estos pueden incluir aceites esenciales, extractos fenólicos o nanopartículas, los cuales se liberan gradualmente hacia el alimento o el espacio de cabeza del envase, generando **actividad antimicrobiana y/o antioxidante** (Fang et al., 2022; Buazzi et al., 2023).

5.4 Tendencias

Las tendencias actuales en el desarrollo de biocompositos se orientan hacia la innovación tecnológica y la sostenibilidad. Algunas de las principales son:

1. **Uso de nanomateriales:** La incorporación de nanocelulosa o nanofibras mejora significativamente las propiedades mecánicas, térmicas y de barrera de los biocompositos, ampliando sus aplicaciones en empaques alimentarios y medicina regenerativa (Moon et al., 2011).
2. **Aplicaciones en la economía circular:** Se busca valorizar residuos agroindustriales como cáscaras, bagazo, paja o fibras agrícolas para generar biocompositos de alto valor agregado, disminuyendo los desechos y fomentando la sostenibilidad (Khalil et al., 2018).
3. **Sustitución en la industria automotriz y construcción:** Existe un crecimiento en el uso de biocompositos para interiores de automóviles, tableros, paneles y materiales de aislamiento, ya que ofrecen reducción de peso, resistencia adecuada y menor huella ambiental (Faruk et al., 2012).

4. **Funcionalización avanzada:** Se desarrollan biocompositos inteligentes con propiedades adicionales como conductividad, antimicrobianos o liberación controlada de sustancias activas, lo que amplía su uso en medicina y dispositivos electrónicos (Kumar et al., 2020).

En este sentido, los biocompositos representan una alternativa prometedora frente a los materiales convencionales, alineándose con las políticas internacionales de sostenibilidad y con la creciente demanda de productos más ecológicos.

5.4.1 Tendencias en envasado

La evolución del envasado ha evolucionado significativamente dentro de las ultimas décadas, encargándose de cumplir la función de proteger la integridad del medio ambiente, las nuevas tecnologías han avanzado tanto que ayudan a prolograr la vida útil así como mejorar seguridad y brindan una información mas clara al consumidor, dentro de las innovaciones destacan el ampackado inteligente y empackado activo, los cuales garantizan sostenibilidad, una inocuidad adecuada y trazabilidad en la industria alimentaria.

5.4.2 Empacado inteligente

Los envases inteligentes tienen como objetivo monitorear ciertos aspectos del producto que contienen y reportar esta información, que puede ser sobre el entorno del envase o directamente sobre la calidad del producto contenido, al consumidor. Para medir la calidad debe existir contacto directo entre el producto y el envase o entre el envase y el espacio libre. A fin de cuentas, el envase inteligente debe ayudar al consumidor en la decisión de compra, argumentada en la vida útil del producto, la calidad y la seguridad en el consumo, así como advertir de posibles problemas. Algunos ejemplos pueden ser los códigos QR que aparecen al enfriarse o calentarse un alimento, que, al ser escaneados con un smartphone, conducen al consumidor a un sitio web con promociones y contenidos exclusivos; los cambios de color en la

etiqueta de un producto que indican que se cortó la cadena de frío o ha sufrido descomposición; el cambio de color en la etiqueta demostrando la calidad del producto, entre otros.

5.4.3 Tecnologías aplicadas a envases inteligentes

La tecnología líder en diseño de envases inteligentes tiene que ver con la introducción de indicadores temperatura-tiempo (TTI, por sus siglas en inglés).

Existen dos tipos de TTI:

TTI de historia parcial: el indicador no responde a menos que el umbral de temperatura haya sido traspasado e indica si el producto fue expuesto a esa temperatura durante un tiempo suficiente para causar un cambio en la calidad o seguridad del producto.

TTI de historia completa: da una respuesta continua y completa en función de la temperatura a lo largo de toda la historia del producto o embalaje.

5.4.4 Empacado activo

Este tipo de envases se basa en las propiedades intrínsecas de los polímeros utilizados para conformarlos o en la introducción de sustancias específicas en los propios polímeros (aditivos), para lograr el efecto deseado de preservar el producto o proveer de una barrera inerte contra el entorno.

Algunas aplicaciones de envases activos:

Control de humedad: El control de la humedad es fundamental para disminuir la actividad del agua y suprimir el crecimiento microbiano. Para lograrlo, se colocan absorbentes de humedad junto al producto o se empaca el producto con un film que no permite el paso de la humedad (capa de polímero con gran capacidad de absorción de agua entre otras dos capas de polímero convencional). En productos comerciales para carne fresca, se ha conseguido absorción de agua desde los 25 a los 50 gramos. Para vegetales, se ha extendido la vida útil del producto hasta 12-14 días.

Remoción de oxígeno: Un elevado contenido de oxígeno en el envase de los alimentos permite el crecimiento microbiano, cambios de color, pérdida nutricional y reducción de la vida útil del producto. El envasado al vacío tiene un remanente de oxígeno que puede propiciar los puntos antes dichos, pero este oxígeno remanente se puede remover utilizando la tecnología de envases activos. La mayoría de los removedores de oxígeno comerciales están basados en el principio de la oxidación del hierro. Se pegan al film plástico sachets con virutas de hierro, elemento que, mediante una reacción de oxidación-reducción, consume oxígeno y forma hidróxido de hierro, disminuyendo así la cantidad de oxígeno libre. Los absorbentes de oxígeno se encuentran comúnmente en empaques de carne vacuna y aviar, café y comidas deshidratadas.

Control microbiano: Algunos sachets liberan etanol como agente antimicrobiano para extender la vida útil de productos horneados con alto contenido de humedad. Muchos documentos científicos evidencian el uso de etanol para prevenir el crecimiento de moho, hongos y bacterias. Se ha demostrado que el uso de envases activos liberadores de etanol al 95% aumenta significativamente la vida útil de los productos panificados (en al menos 10 días). Otra opción para el control del crecimiento de microorganismos se basa en el agregado de aceites esenciales extraídos de especias, por ejemplo: aceite esencial de orégano, aceite de mostaza, aceite de canela, entre otros. Se ha estudiado el agregado de aceite esencial de orégano junto a un absorbente de oxígeno en la preservación de ensaladas envasadas. Se documenta que este método extiende la vida útil del producto de 24 a 60 días. En general, con respecto a los envases activos con sachets, las desventajas radican principalmente en que no pueden ser utilizados para alimentos líquidos y pueden ser ingeridos accidentalmente por los consumidores. Uno de los últimos adelantos respecto a empaques activos son los envases que liberan sustancias antimicrobianas de forma controlada. El principio básico de este concepto es el cambio en el entorno del envase: pH, temperatura, radiación UV. El envase responde a este estímulo externo liberando el componente antimicrobiano. La gran ventaja es que el sistema solamente

responde al estímulo indicado, haciéndolo muy eficiente respecto a a otros sistemas de extensión de vida útil de alimentos

5.4.5 Atrapadores de oxígeno

Los atrapadores de oxígeno (oxygen scavengers) son sistemas diseñados para reducir la concentración de oxígeno dentro del envase, lo cual retrasa procesos de oxidación y el crecimiento de microorganismos aerobios. Estos pueden estar basados en polvos de hierro, ácido ascórbico o enzimas como la glucosa oxidasa (Vermeiren et al., 1999). Su aplicación es común en productos sensibles a la oxidación, como carnes, lácteos y alimentos fritos.

5.4.6 Emisores

Los emisores son componentes del envase que liberan sustancias específicas con el fin de prolongar la vida útil del alimento. Entre los más utilizados se encuentran los emisores de dióxido de carbono, que inhiben el desarrollo de bacterias y mohos, y los emisores de etanol, empleados principalmente en productos de panadería para retardar el crecimiento de hongos (Appendini & Hotchkiss, 2002).

5.4.7 Antimicrobianos

Los aceites esenciales de plantas aromáticas poseen un fuerte potencial antimicrobiano y antioxidante, por lo que su uso como conservantes natural satisface la demanda de los consumidores de alimentos seguros, sanos y nutritivos; debido a su gran potencial, pueden actuar contra los microorganismos patógenos que causan enfermedades en los consumidores y así mismo la vida útil de los alimentos se alargará y la calidad se mantendrá. Los aceites esenciales tienen una amplia variedad de compuestos químicos que actúan estableciendo relaciones de sinergismo para realizar las actividades antimicrobianas, antioxidantes, antifúngicas, antivirales, insecticidas, entre otras que los caracterizan. Estas sustancias pueden encontrarse y ser extraídas de diversas partes de la planta aromática, como en las flores, hojas, raíces, rizomas, frutas, semillas, madera, resinas, superficie de las hojas y cálices, variando significativamente en sus propiedades químicas. Además de la actividad antimicrobiana y antioxidante que es

descrita, se ha reportado el uso de los aceites esenciales en envases ó empaques (envases activos) que van a proteger y le van a conferir directa ó indirectamente al alimento las propiedades anteriormente mencionadas. Igualmente se abordan una serie de limitaciones que se presentan al trabajar o utilizar aceites esenciales en la conservación de los alimentos.

Comentado [MHG3]: De esto ya hablaste antes. Revisa la información e integra en uno solo.

5.5 Conservación de productos cárnicos

Los productos cárnicos suelen tener diferentes manipulaciones antes de que lleguen al consumidor, por ello es importante elegir el método de conservación adecuado para que los productos tengan una mayor vida de anaquel. Como se sabe los empaques tienen la función de conservar y proteger, así como mantener la integridad y calidad de el producto.

El color, frescura e inocuidad de la carne o derivados cárnicos son una parte importante para que el consumidor decida adquirirlo o no. Los procesos más utilizados para empacar las carnes frescas y derivados cárnicos son: el empacado permeable al aire, en atmósferas modificada y al vacío.

Los productos cárnicos se encuentran dentro de los alimentos con proceso de descomposición más rápidos y esto hace que sean un medio de cultivo ideal para los microorganismos (patógenos y deteriorantes). Se puede mejorar la calidad de estos o reducirla de acuerdo a la calidad que se tenga al manejarlos, al garantizar la calidad de los productos cárnicos, se cuenta con la garantía de que al momento que el consumidor ingiera el alimento su salud no se vera perjudicada, el consumidor pide que el producto tenga algunas características en las cuales se encuentran la frescura y el color estable y brillante característico de la carne, para que todo esto se logre se debe tener en cuenta la importancia de contar con un buen empaque el cual ayudara a preservar la calidad.

5.6 Técnicas de conservación

La tecnología que se ha utilizado para empacar la carne fresca y los productos cárnicos procesados ha consistido principalmente en el empacado permeable al aire, atmósfera modificada y empaque al vacío. Este último es considerado por

algunos autores como una forma de empackado en atmósferas modificadas (Belcher, 2006).

Ejemplos de algunos empaques con técnicas de conservación son:

La charola de espuma de poliestireno convencional, con o sin almohadilla absorbente y con una película envolvente de cloruro de polivinilo, es una técnica comúnmente encontrada en el mercado mexicano debido a la facilidad de su utilización, tecnología sencilla y bajo costo. Sin embargo, la vida útil del producto no se prolonga considerablemente debido a que facilita la proliferación de microorganismos aunque, por otra parte, para los productos procesados, sobre todo para los de baja humedad, como los chorizos, este es un empaque adecuado.

Sistemas al vacío

El hecho de mantener la carne bajo condiciones libres de O₂, extiende la vida de anaquel considerablemente. Empacar al vacío no ha sido un método exitoso para la venta de carne, posiblemente porque ésta adquiere un color púrpura, oscuro y que con presencia de exudado visible en el empaque. Esta técnica se ha mejorado usando doble película, donde la superficial es impermeable y desprendible (empaque madre) y la interior permite la penetración de O₂, por lo que la carne adquiere un color rojo brillante (Charles et al., 2006; Sorheim y Nissen, 2008)

Atmósferas modificadas.

Consiste en eliminar el aire dentro del empaque que contiene la carne o producto cárnico, para posteriormente inyectar un gas o mezcla de gases. Se ha modificado el ambiente gaseoso a fin de reducir el grado de respiración y con ello disminuir el crecimiento microbiano y, por lo tanto, retrasar el deterioro debido a la producción de metabolitos microbianos y a la actividad enzimática residual de la carne; con ello se logra un mayor periodo de anaquel del producto (García et al., 2006). La vida útil de la carne empacada en atmósferas modificadas aumenta entre 10 y 15% cuando se utiliza una película con permeabilidad al O₂ por debajo de 2 cm³. m².día.atm⁻¹ (Taik, 2010), teniendo cuidado de que la carne empacada no sea expuesta a altas concentraciones de O₂, ya que acelera el crecimiento de microorganismos aerobios y favorece la oxidación de lípidos y mioglobina

5.7 Carne de pollo

5.7.1 Demanda consumo principales

La carne de pollo es una de las fuentes de proteína más económicas y conocidas a nivel mundial, ya que esta contiene un bajo contenido de grasa y altos contenidos de ácidos grasos que se dice podría ser un beneficio para la salud vascular de los humanos. En 2019, las tasas de consumo de carne de ave, per cápita en el mundo y los EE. UU., fueron de aproximadamente 14,7 kg (OCDE-FAO), que fueron más altas que las de cualquier otra fuente de carne, incluida la carne de cerdo, res, oveja y cabra. Se espera que el consumo mundial de carne de ave continúe aumentando anualmente debido a un aumento en la población mundial y la preferencia. Para satisfacer esta creciente demanda de carne de ave, se han producido mejoras significativas en la producción de carne de pollo de engorde. Por ejemplo, mientras que los pollos de engorde de 42 días pesaban alrededor de 586 g con una tasa de conversión alimenticia de 2,8 en 1957, los pollos de engorde modernos pesan alrededor de 3278 g con una tasa de conversión alimenticia de 1,55 a los 42 días de edad, según Cobb500 broiler performance and nutrition supplement 2022. La carne de pollo de engorde se considera la fuente de proteína animal más rentable y sostenible debido a la eficiencia de las aves en la conversión de alimento en carne.

Si bien los programas efectivos de selección genética y nutrición han mejorado drásticamente la productividad y la eficiencia de la industria avícola, los pollos de engorde de rápido crecimiento muestran con mayor frecuencia una calidad de carne desfavorable en comparación con los pollos de engorde de crecimiento lento. La producción avícola continúa enfrentando una amplia gama de desafíos, incluidos los problemas de costos de los alimentos, infecciones bacterianas y parasitarias, estrés por calor, micotoxinas, etc., que pueden resultar en una composición corporal alterada, mayores preocupaciones sobre la seguridad alimentaria y una reducción del rendimiento y la calidad de la carne. Los parámetros de calidad de la carne afectados negativamente, incluida la capacidad de retención de agua (CRA), las miopatías, la textura y el sabor pueden influir en la aceptación del consumidor. Se

sabe que la nutrición tiene una influencia sustancial en la calidad de la carne y la composición corporal de los pollos de engorde.

5.7.2 Tasa de crecimiento rápida

Através de más de 70 años de intensa selección genética y programas nutricionales efectivos, se ha logrado un mayor peso corporal, tasas de crecimiento y eficiencia alimenticia entre los pollos de engorde modernos. Los programas de selección genética y nutricionales se han diseñado para producir pollos de engorde con mayores rendimientos de carne de pechuga y peso corporal sin considerar la acumulación de grasa, lo que resulta en altos niveles de acumulación de grasa en los pollos de engorde modernos. El aumento de la producción de carne de pechuga ha resultado en una disminución en la producción de carne de pierna en los pollos de engorde modernos debido a un cambio en la forma del cuerpo. Los pollos de engorde modernos contienen aproximadamente entre un 15 y un 20 % de grasa, y la mayoría (>85 %) de la grasa no es necesaria para la función corporal de los pollos de engorde. En el crecimiento rápido, la relación desequilibrada entre oxidantes y antioxidantes en el cuerpo y el suministro limitado de oxígeno en comparación con la demanda requerida para el crecimiento rápido pueden conducir al estrés oxidativo y la hipoxia, respectivamente, lo que resulta en peroxidación lipídica y pechuga leñosa (WB) en pollos de engorde modernos. Se han observado diferencias en la calidad de la carne entre pollos de engorde de crecimiento lento y rápido. En general, los pollos de engorde de crecimiento rápido mostraron un menor contenido de proteína y un mayor contenido de grasa en comparación con los pollos de engorde de crecimiento lento. Sin embargo, las diferencias en los parámetros de calidad de la carne, como el pH, el color y la capacidad de retención de agua (CRA), en pollos de engorde de crecimiento lento y rápido no fueron consistentes, posiblemente porque las cepas de pollos de engorde de crecimiento lento variaron entre los estudios. Según Che *et al.* las tasas de incidencia de Spaghetti Meat (SM), Miopatía muscular caracterizada por la separación de las fibras musculares de la pechuga, dando una textura blanda y fibrosa similar a espagueti.

Wooden Breast (WB), Miopatía muscular severa que provoca endurecimiento anormal del músculo pectoral, afectando negativamente la textura y calidad sensorial. White Striping (WS), Miopatía caracterizada por la presencia de líneas blancas paralelas a las fibras musculares en la pechuga, asociadas con mayor contenido de grasa y menor calidad nutricional. fueron de casi el 36, 12 y 96 %, respectivamente, y aproximadamente el 85 % de la carne de pechuga presentó varias miopatías en Ontario, Canadá. Si bien no se realizaron estudios que compararan la incidencia de miopatías mamarias entre pollos de engorde de crecimiento rápido y lento, la prevalencia de miopatías mamarias sería mayor en los pollos de engorde modernos de crecimiento rápido, lo que podría deberse a un mayor rendimiento de carne de pechuga y a un mayor estrés oxidativo en comparación con los pollos de engorde de crecimiento lento. Además, Zhang et al. y Popova et al. sugirieron que los pollos de engorde de rápido crecimiento, sacrificados a una edad temprana (D 42), podrían contener menos ácidos grasos poliinsaturados que los pollos de crecimiento lento (criados después de los D 42), ya que los pollos mayores tienden a tener un mayor contenido de ácidos grasos poliinsaturados en la pechuga. Por lo tanto, si bien los pollos de engorde modernos tienen un mayor rendimiento de carne en comparación con los de crecimiento lento, la carne de estos últimos podría tener un mayor contenido de grasa, menores proporciones de ácidos grasos poliinsaturados omega-3 y mayor incidencia de miopatías musculares.

5.7.3 Peligros, deterioro y agentes corruptores

Las infecciones bacterianas, que pueden ser causadas por condiciones de crianza desfavorables y alta densidad de población, serían críticas en la producción de pollos de engorde. Las bacterias patógenas e infecciosas comunes en la producción de pollos de engorde incluyen *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* spp., *Clostridium perfringens*, *Escherichia coli*, etc. Esas infecciones bacterianas pueden afectar negativamente la producción de carne y la calidad de los pollos de engorde, potencialmente a través de la disminución de la utilización de nutrientes, induciendo inflamación e influyendo en la seguridad alimentaria. Por ejemplo, se han detectado patógenos invasivos transmitidos por alimentos,

incluidos *Salmonella* spp., *C. jejuni* y *S. aureus* en la carne de pollo. La infección por *Salmonella* Enteritidis aumentó la acumulación de grasa al aumentar la síntesis de lípidos y reducir el transporte de lípidos en el hígado, lo que potencialmente puede afectar la acumulación de grasa dentro de los cuerpos de los pollos. Sadeghi et al. demostró que la infección por *S. Enteritidis* aumentó la concentración plasmática de malondialdehído (MDA), un indicador de peroxidación lipídica, y redujo la capacidad antioxidante total del plasma, lo que potencialmente resultó en un aumento de la peroxidación lipídica en la carne de pollo. Asimismo, muchos estudios han demostrado que la infección por *Campylobacter* puede inducir estrés oxidativo sistémico, que tiene el potencial de inducir la peroxidación lipídica en el músculo.

5.7.4 condiciones de almacenamiento transporte y envasado.

El almacenamiento, transporte y envasado de la carne de pollo son etapas críticas dentro de la cadena de suministro, ya que determinan en gran medida su calidad, inocuidad y vida útil. Debido a su alta actividad de agua y contenido proteico, la carne de pollo es un producto altamente perecedero y susceptible a la contaminación microbiana y a la degradación físico-química si no se mantienen las condiciones adecuadas de temperatura, humedad y manipulación (Liu et al., 2020).

Durante el almacenamiento, se recomienda mantener la carne de pollo a temperaturas de refrigeración entre 0 °C y 4 °C para productos frescos y por debajo de -18 °C para productos congelados, con el fin de ralentizar el crecimiento de microorganismos y preservar las propiedades sensoriales (FAO, 2021). Además, el uso de atmósferas modificadas y empaques al vacío ha demostrado ser eficaz para extender la vida útil al limitar la oxidación lipídica y el desarrollo bacteriano (Zhuang et al., 2022).

En cuanto al transporte, es fundamental mantener la cadena de frío de manera continua, evitando fluctuaciones térmicas que puedan favorecer la proliferación de patógenos como *Salmonella* spp. y *Listeria monocytogenes* (Li et al., 2023). Los vehículos de transporte deben estar equipados con sistemas de refrigeración

calibrados y registros de temperatura, garantizando la trazabilidad del producto desde el procesamiento hasta el punto de venta.

Finalmente, el envasado cumple una función esencial no solo en la protección del producto, sino también en la presentación comercial y la información al consumidor. En la actualidad, las tendencias en envasado incluyen el uso de biopolímeros y empaques activos, como anteriormente se describió, los cuales incorporan agentes antimicrobianos o absorbentes de oxígeno para mejorar la conservación del producto sin recurrir a aditivos químicos (Fernández-Pan et al., 2021). Estas innovaciones buscan equilibrar la seguridad alimentaria con la sostenibilidad ambiental, en respuesta a las nuevas demandas del mercado.

En conjunto, el control riguroso de las condiciones de almacenamiento, transporte y envasado es indispensable para asegurar la calidad sanitaria y comercial de la carne de pollo, además de reducir pérdidas postcosecha y garantizar la satisfacción del consumidor.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó dentro del laboratorio de inocuidad y empaques el cual se encuentra en el departamento de ciencia y tecnología de alimentos, ubicado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, la cual se encuentra en Saltillo Coah; en conjunto con la universidad Autónoma de Chihuahua, ubicada en Ciudad Juárez.

6.1 Etapa 1.- Obtención de materiales base

6.1.1 Almidón

Se utilizó almidón comercial de maíz, grado analítico, con el objetivo de asegurar una pureza y composición constante, así como la reproducibilidad de los resultados durante las etapas de caracterización y procesamiento de los materiales.

6.1.2 Polisuccinimida

El procedimiento inició con la quema controlada de la PSI en un vaso de precipitados a baja temperatura. Durante el calentamiento, el material se movió de forma continua y cuidadosa para garantizar una distribución uniforme del calor. Este proceso se mantuvo hasta que la muestra adquirió una tonalidad rosa clara, lo cual indicó el proceso de policondensación térmica, lo anterior de acuerdo a la metodología propuesta por Benet, 2005, llevando a cabo subsecuentes procesos de filtrado, lavado y neutralización. La figura 1 muestra el proceso para la obtención de la PSI.

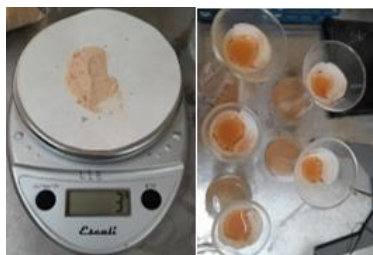


Ilustración 1: Proceso para la obtención de PSI (Elaboración propia)

6.1.3 Microcelulosa

La microcelulosa natural se obtuvo de acuerdo al método establecido por (Isidro,2019), el cual se basa en la utilización de fibras de agave de lechuguilla, la cual lleva un proceso de el cual consiste en recibir un tratamiento de ácido sulfúrico al 98% del cual se adiciona 20 ml por cada gramo de fibra, posteriormente se lleva a un proceso de cloración para la obtención de un blanqueamiento, se van realizando una serie de lavados con agua destilada para neutralizar el Ph, y por último poder eliminar un mayor porcentaje de humedad mediante un secado en una estufa a 60°C por 24hrs.

Una vez que nuestras fibras están secas se pasan a un proceso de molienda del cual obtenemos Microcelulosa nativa (MCN) la cual es tamizada en una malla del número 150 con abertura de 140 micrómetros, la cual se recolecta para su uso posterior.

6.1.4 Microcelulosa acetilada

Una vez obtenida la MCN se llevó a cabo el proceso de acetilación bajo la técnica de incorporación de ácido acético (AA) a la microcelulosa, utilizando como catalizador ácido tartárico (TA).

Las concentraciones para el proceso de acetilación se llevaron a cabo de la siguiente manera

Para la realización del experimento se utilizó MCA como materia prima, en una cantidad de 5 g. Como reactivo se empleó AA en un volumen de 50 mL. La reacción se llevó a cabo en presencia de TA como catalizador, en una proporción de 0.47. El tiempo de reacción se estableció en 3 horas. Estas condiciones experimentales se mantuvieron constantes en todas las corridas realizadas.

Para el proceso de acetilación se utilizó la microcelulosa natural la cual obtuvimos de la fibra de lechuguilla de la cual se colocaron 0.5g dentro de un matraz de balón con capacidad de 250 ml, en el cual se añadieron 50ml de ácido acético, además

de adicionar ácido tartárico (TA), como catalizador de la reacción, añadiendo 0.47g; para llevar a cabo estas reacciones se utilizó un sistema de condensador de flujo, a una temperatura de 120°C, con una agitación magnética constante por un tiempo de 3 hrs. El método de condensador de flujo nos ayuda a poder recuperar el agente que se volatiliza debido a la ebullición que se provoca, haciéndolo recircular. Ejemplo del sistema en la figura 4



Ilustración 2: Sistema de recirculación (Elaboración propia)

Cumpliendo las 3hrs de acetilación, la MCA, se filtra ayudándonos de un embudo el cual se coloca en un matraz para realizar una serie de lavados con agua destilada, hasta que se logra obtener el pH neutro.

Ya que tenemos nuestra MCA en el pH que se requiere, se lleva a un proceso de secado, en el cual se tiene que tener a una temperatura de 50°C por un tiempo de 24hrs, tal como se muestra en la figura 5.



Ilustración 3: Estufa de secado para MCA (Elaboración propia)

6.2 Etapa 2.- Elaboración de empaques

6.2.1 Extrusión

Para la elaboración de las mezclas destinadas al proceso de extrusión se prepararon cuatro formulaciones correspondientes a los tratamientos A, B, C y D, cada una con proporciones específicas de los componentes base: almidón, microcelulosa neutra (MCN), microcelulosa acetilada (MCA), glicerol y agente emulsionante oleoso (AEO). Todos los tratamientos mantuvieron una proporción constante de 22.22% de almidón, 22.22% de polisuccidimida (psi) y 3.1% de AEO, variando únicamente el tipo y la cantidad de microcelulosa utilizada, así como el glicerol empleado como plastificante.

Los tratamientos se emplearon como se muestra en la tabla 1

Tabla 1: Tratamientos de empaques

Tratamiento	Psi	Almidon	MCN	MCA	Glicerol	AEO	SUMATORIA	Cantidad de cajas
A	22..22	22..22	22..22	0	30.22	3.1	99.98	12
B	22..22	22..22	0	22.22	30.22	3.1	99.98	12
C	22..22	22..22	22..22	0	30.22	0	99.98	6
D	22..22	22..22	0	22.22	30.22	0	99.98	6

(Elaboración propia) 1

- **Tratamiento A:** Contiene MCN como única fuente de microcelulosa (22.22%), acompañado de 30.22% de glicerol, así como 22.22% de almidón y polisuccidimida.
- **Tratamiento B:** Similar al tratamiento A, pero incorporando MCA (22.22%) en lugar de MCN, manteniendo la misma proporción de glicerol (30.22%), almidón, polisuccidimida y AEO.
- **Tratamiento C:** Integra de manera conjunta almidón, MCN y PSI (22.22% cada uno), incrementando el glicerol a 33.32% para mejorar la plasticidad de la mezcla.
- **Tratamiento D:** Combina almidón y MCA (22.22% cada uno), empleando igualmente 33.32% de glicerol.

Cada formulación fue preparada hasta alcanzar una **sumatoria total de 99.98%**, equivalente a **12 cajas para A y B**, y **6 cajas para C y D**, de acuerdo con la disponibilidad del material tratado.

Estos tratamientos permitieron comparar el comportamiento de la microcelulosa en su forma nativa y acetilada, tanto sola como combinada con almidón, polisuccidimida y AEO para analizar sus efectos durante el proceso de extrusión y su desempeño como matriz o refuerzo en materiales compuestos.

6.2.2 Termoformado

El termoformado constituye una etapa fundamental para evaluar la capacidad de conformación y estabilidad térmica de los materiales poliméricos obtenidos a partir de microcelulosa de lechuguilla. Este proceso consiste en la aplicación controlada de calor y presión con el propósito de inducir la transición del material desde un estado rígido o semirrígido hacia una condición viscoelástica en la que puede moldearse o ser conformado en una geometría predeterminada.

En este estudio, el termoformado de las mezclas provenientes de los tratamientos A, B, C y D se llevó a cabo utilizando una **tortilladora modificada como prensa térmica**, operada a una temperatura superficial de **250 °C**. El material extruido se colocó entre las placas calientes durante **5 minutos**, tiempo suficiente para permitir el ablandamiento térmico de la matriz polimérica compuesta por almidón, glicerol y microcelulosa (nativa o acetilada). Bajo estas condiciones, el calor promovió la movilidad molecular, la reorganización parcial de las cadenas polisacarídicas y, en algunos casos, la consolidación de enlaces intermoleculares.

Una vez transcurrido el tiempo de calentamiento, las láminas fueron retiradas y transferidas inmediatamente a una **segunda tortilladora sin calentamiento**, utilizada como sistema de enfriamiento y fijación de forma. Esta etapa de enfriamiento rápido permitió estabilizar la estructura obtenida, evitando deformaciones posteriores y favoreciendo la solidificación del material bajo una presión constante. El choque térmico entre las dos fases del proceso contribuyó a

mejorar la rigidez final de las láminas y a preservar la integridad física del material termoformado.

Este procedimiento permitió analizar la respuesta térmica de cada formulación y su aptitud para ser moldeada mediante procesos convencionales de prensado, proporcionando información relevante sobre su potencial uso en la fabricación de empaques biodegradables u otros biocompuestos.

6.3 Etapa 3.- Caracterización de los materiales obtenidos

6.3.1 Caracterización química

Se llevo a cabo la caracterización de la MC y la elaboración de empaques dentro del departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

La espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

se empleó para identificar los grupos funcionales presentes en los biopolímeros obtenidos a partir de microcelulosa de lechuguilla y almidón, así como para evaluar posibles interacciones químicas entre los componentes de los tratamientos A, B, C y D. Esta técnica es fundamental en la caracterización de materiales poliméricos, ya que permite analizar cambios estructurales derivados de procesos como la acetilación de la microcelulosa, la adición de glicerol como plastificante y el termoformado de las formulaciones.

Para el análisis, se tomaron fragmentos representativos de cada lámina termoformada y se colocaron directamente en el accesorio del espectrómetro

El análisis espectral permitió comparar las diferencias entre los tratamientos, evidenciando modificaciones químicas y posibles interacciones entre la celulosa, el almidón, el glicerol y el AEO. Estas variaciones son indicativas del grado de compatibilidad entre los componentes, del éxito del proceso de acetilación y del

efecto que los tratamientos térmicos (extrusión y termoformado) tuvieron sobre la estructura molecular del material.

6.4 Etapa 4.- Evaluación de la actividad antimicrobiana

Evaluación de la calidad física y microbiológica de la carne de pollo almacenada en bioempaques antimicrobianos

6.4.1 Acondicionamiento de la carne de pollo

Se depositaron 15 g de pechuga de pollo previamente cortada en cuadros de 2x2 cm aproximadamente en los envases y posteriormente se introdujeron en bolsas Ziploc ® y fueron almacenadas en refrigeración a 4 °C (HR≈50%) por 7 días. Se realizaron muestreos a los 0, 2, 4 y 7 días para realizar los análisis que se describen a continuación.

6.4.1.1 Propiedades Físicas

6.4.1.1.1 Color y humedad de la carne

El análisis de color se determinó empleando un colorímetro Konica Minolta (Konica Minolta Sensing CR 400, Inc, Osaka, Japón) y se determinaron las variables de Luminosidad (L), cromaticidad a* y cromaticidad b*. Por otra parte, la humedad de la carne se realizó por el método 926.08 establecido por Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1980)

6.4.1.2 Actividad antibacteriana.

6.4.1.2.1 Difusión en Placa

La actividad antibacteriana se determinó por el método de difusión en placa bajo la metodología propuesta por Pandey et al. (2020) con algunas modificaciones. Se utilizaron los microorganismos *Staphylococcus aureus* 43300, *Escherichia coli* 25922 y *Bacillus subtilis*. Cada uno de los microorganismos se preparó a una concentración aproximada de 1×10^8 UFC/mL empleando como escala el nefelómetro de McFarland leyendo la absorbancia a 600 nm. Posteriormente se

cortaron muestras del envase en forma de círculos de 5 mm de diámetro empleando una perforadora previamente esterilizada. Enseguida, se tomaron 100 µL de estas soluciones y se sembraron por el método de esparcimiento en placas de agar nutritivo (agar nutritivo, BD bioxon, Estado de México, México) a continuación se colocó en cada placa un círculo de cada tratamiento. Finalmente, las placas se incubaron a 37 °C aeróbicamente (incubadora EQUATHERM modelo C1570, Curtin Matheson Scientific CMS, Inc, Houston Texas, USA). La actividad antibacteriana se reportó en mm midiendo los halos de inhibición formados considerando el diámetro del envase.

6.4.2 Análisis microbiológico

La carne de pollo se inoculó con la bacteria *Staphylococcus aureus* 43300 empleando el nefelómetro de McFarland como se mencionó anteriormente. Posteriormente se pesó 1g de cada tratamiento y se homogenizó con 9 mL de diluyente de máxima recuperación (MRD, CM0733, Qoid, Basingstoke, Hampshire, Inglaterra) para obtener la dilución 1:10, posteriormente se realizaron diluciones seriadas hasta 10⁶. Posteriormente se sembraron 10 µL en los medios por el método de siembra por estría. Para *Staphylococcus aureus* se empleó el agar Baird Parker enriquecido con emulsión de yema de huevo con telurito (base de agar Baird Parker, BD Bioxon, Estado de México) y para mesófilos aerobios totales se empleó agar el agar métodos estándar (agar para métodos estándar, MCD LAB, México) incubados a 37 °C por 48 y 24 h respectivamente.

6.4.3 Análisis estadístico

Para el análisis antibacteriano se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y una comparación de medias por Tukey usando el procedimiento GLM del software SAS 9.4, (SAS institute, Inc., 2023) en un diseño completamente al azar bajo el siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + E_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Variable de respuesta medida en la j-esima repetición j del tratamiento i

μ = Media general

T_i = Efecto del tratamiento

E_{ij} = Error aleatorio medido en la repetición j del tratamiento i

Para el efecto del envase en las características de la carne se realizó un factorial de dos vías, considerando como factores los tratamientos y el tiempo de almacenamiento, así como su interacción en un diseño completamente al azar usando para su análisis el procedimiento y software descrito anteriormente bajo el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + E_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Variable de respuesta medida en la observación k en el tratamiento i y el tiempo de almacenamiento j

μ = Media general

A_i = Efecto de los tratamientos i

B_j = efecto del tiempo de almacenamiento j

AB_{ij} = Efecto de la interacción del tratamiento i y el tiempo de almacenamiento j

E_{ijk} = error aleatorio medido en las observaciones k , en el tratamiento i y tiempo de almacenamiento j .

7. RESULTADOS Y DISCUSIONES

7.1 Etapa 1: Descripción de materiales

Para la elaboración y caracterización de los materiales evaluados en el presente estudio se emplearon los siguientes insumos:

El **almidón de maíz** fue utilizado como matriz polimérica principal, debido a su origen natural, biodegradabilidad y capacidad para formar películas cuando se somete a procesos térmicos y de plastificación. Este material es ampliamente empleado en el desarrollo de biopolímeros para aplicaciones en empaques.

La **polisuccinimida** se empleó como agente funcional, debido a sus propiedades químicas y su potencial para modificar las características estructurales del material, contribuyendo a la mejora de la estabilidad y compatibilidad del sistema polimérico.

La **microcelulosa natural** y la **microcelulosa acetilada** fueron utilizadas como materiales de refuerzo, con el propósito de mejorar las propiedades mecánicas y estructurales de los biocompuestos. La microcelulosa acetilada, al presentar modificaciones químicas en su superficie, favorece una mejor interacción con la matriz polimérica en comparación con la microcelulosa natural.

El **glicerol** fue empleado como plastificante, debido a su capacidad para reducir la fragilidad del material, aumentar la flexibilidad y mejorar la procesabilidad de las películas obtenidas.

7.2 Etapa 2: descripción de elaboración de empaques

Los empaques biodegradables se elaboraron a partir de una matriz polimérica a base de almidón de maíz, incorporando polisuccinimida, microcelulosa natural y microcelulosa acetilada, así como glicerol como plastificante. En primer lugar, el almidón de maíz se dispersó en agua destilada bajo agitación constante, hasta

obtener una suspensión homogénea. Posteriormente, se añadió el glicerol, el cual permitió mejorar la flexibilidad y procesabilidad del material.

Una vez obtenida la mezcla inicial, se incorporó la polisuccinimida, manteniendo la agitación para asegurar su adecuada dispersión dentro de la matriz polimérica. De manera posterior, se adicionó la microcelulosa, tanto en su forma natural como acetilada, según el tratamiento correspondiente, con el fin de reforzar estructuralmente el biopolímero y mejorar sus propiedades físicas.

La mezcla resultante se sometió a calentamiento controlado, promoviendo la gelatinización del almidón y la integración de los componentes, hasta obtener una solución viscosa y homogénea. Posteriormente, el material fue moldeado mediante un proceso de termoformado, utilizando una tortilladora a una temperatura aproximada de 250 °C durante un tiempo de 5 minutos. Una vez concluido el calentamiento, el material se retiró y se colocó inmediatamente en un sistema de enfriamiento para favorecer la solidificación y estabilidad del empaque.

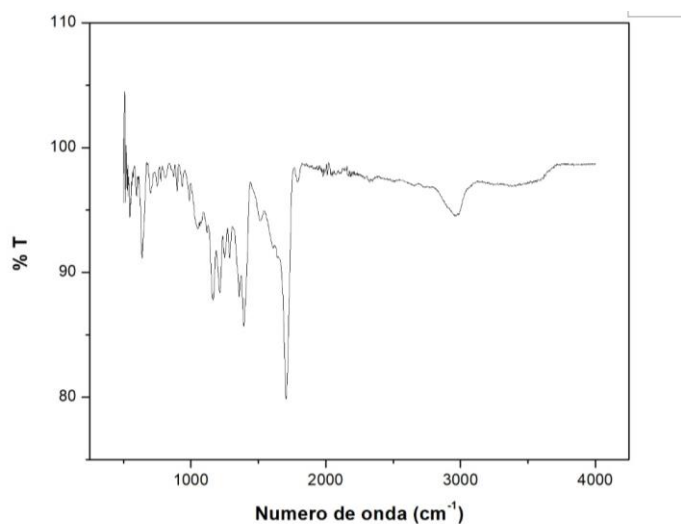
Finalmente, los empaques obtenidos se dejaron reposar a temperatura ambiente hasta su completo enfriamiento, para posteriormente ser almacenados en condiciones controladas, previo a su caracterización fisicoquímica y microbiológica.

7.3 Etapa 3: caracterización química de los materiales

7.3.1 Análisis de polisuccidimida con espectrofotometría infrarroja transformada de fourier (FTIR)

Al analizar la polisuccidimida se obtuvieron resultados por medio del FTIR, donde se muestran las distintas bandas que arroja el equipo, los resultados obtenidos se muestran en la figura 4, esta fue ocupada para los tratamientos

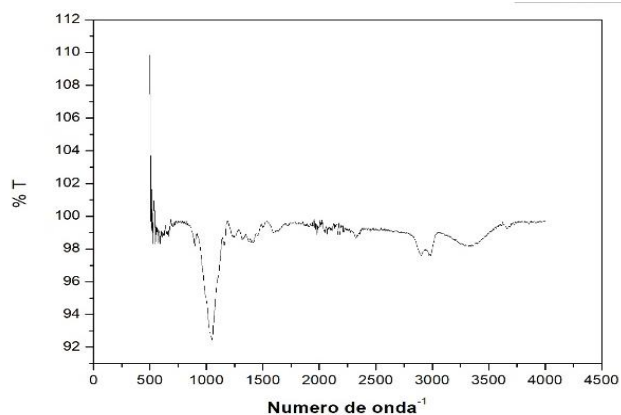
Ilustración 4: FTIR POLISUCCIDIMIDA (ilustración propia)



Espectro FTIR de la polisuccimidina (PSI), donde se observan bandas características alrededor de $\sim 3300\text{ cm}^{-1}$ (N-H), $\sim 1770\text{--}1710\text{ cm}^{-1}$ (C=O del grupo imida) y señales en la región de $1400\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ asociadas a enlaces C-N.

7.3.1 Análisis de Microcelulosa natural con espectrofotometría infrarroja transformada de fourier (FTIR)

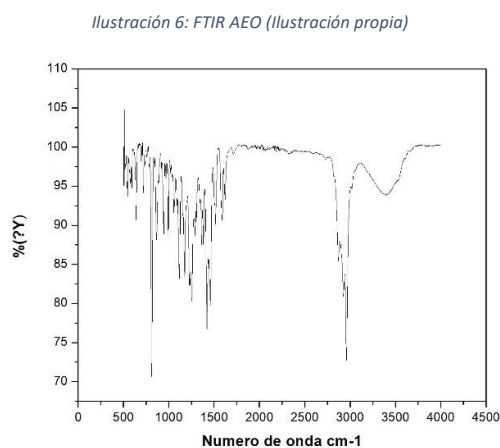
Ilustración 5: FTIR MICROCELULOSA (ilustración propia)



El espectro FTIR de la microcelulosa natural (MCN) se observan bandas características alrededor de N-H), ~1770–1710 cm^{-1} (C=O del grupo imida) y señales en la región de 1400–1200 cm^{-1} asociadas a enlaces C–N.

7.3.2 Análisis de Aceite Esencial de Oregano con espectrofotometría infrarroja transformada de fourier (FTIR)

Al analizar el AEO se obtuvieron resultados por medio del FTIR, donde se muestran las distintas bandas que arroja el equipo, los resultados obtenidos se muestran en la figura 6.



El espectro FTIR del aceite esencial de orégano muestra varias bandas de absorción en rangos como:

Banda ancha en 3400-3500 cm^{-1} : Vibración de estiramiento O-H, indicando presencia de grupos hidroxilo (fenoles o alcoholes).

Bandas en 2900-3000 cm^{-1} : Vibraciones de estiramiento C-H de grupos metilo ($-\text{CH}_3$) y metileno ($-\text{CH}_2-$).

Banda en $1600-1700\text{ cm}^{-1}$: Vibración de estiramiento $\text{C}=\text{C}$, sugiriendo compuestos aromáticos o insaturados.

Región $1200-1500\text{ cm}^{-1}$: Bandas de deformación C-H y estiramiento C-O , típicas de compuestos fenólicos y terpenoides.

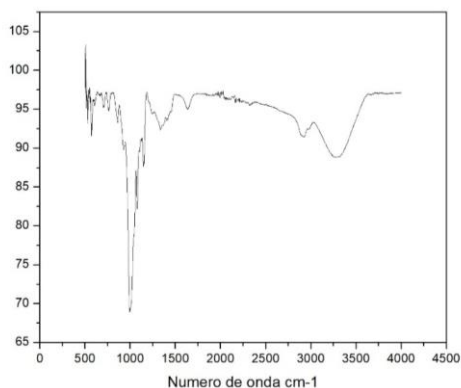
Bandas en $1000-1200\text{ cm}^{-1}$: Vibraciones de estiramiento C-O , indicando ésteres, éteres o alcoholes.

Estos patrones sugieren la presencia de compuestos como carvacrol, timol o γ -terpineno, comunes en el aceite de orégano.

7.3.3 Análisis de Almidon de maíz con espectrofotometría infrarroja transformada de fourier (FTIR)

Al analizar el Almidon se obtuvieron resultados por medio del FTIR, donde se muestran las distintas bandas que arroja el equipo, los resultados obtenidos se muestran en la figura 7.

Ilustración 7: FTIR ALMIDON (Ilustración propia)



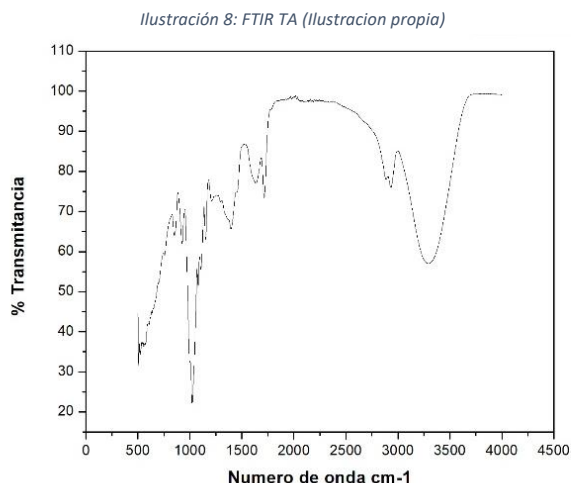
El espectro infrarrojo (FTIR) que se muestra en la imagen corresponde al almidón de maíz. En el gráfico se pueden identificar las siguientes características típicas del almidón:

Banda ancha alrededor de $3300\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$: vibración de estretching O–H (grupos hidroxilo), Pico cerca de 2900 cm^{-1} : vibración de estretching C–H, Banda en $\sim 1640\text{ cm}^{-1}$: agua adsorbida o flexión de O–H, Región entre $1200\text{--}900\text{ cm}^{-1}$: bandas características de enlaces C–O y C–C del anillo glucosídico, típicas de carbohidratos como el almidón

La fuerte absorción en $\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ es común en polisacáridos y refleja la estructura glicosídica del almidón.

7.3.4 Análisis de en TA R1, R2, R3 con espectrofotometría infrarroja transformada de fourier (FTIR)

Para el análisis del tratamiento A se obtuvieron bandas iguales en las tres repeticiones del material.



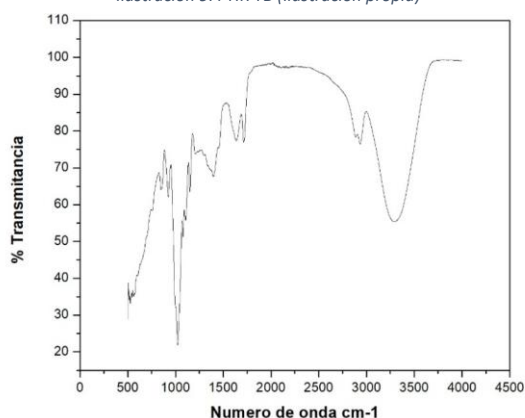
Se notó que hubo una consistencia en los resultados: Que las tres repeticiones sean iguales sugiere una buena repetibilidad del método o análisis utilizado. Esto indica que el proceso de medición o el tratamiento aplicado es bastante estable y no hay mucha variabilidad experimental.

No hay variabilidad intra-repetición: La similitud exacta podría indicar que el sistema es muy controlado o que la técnica de medición tiene una resolución limitada que no capta pequeñas diferencias.

7.3.5 Análisis de en TB R1, R2, R3 con espectrofotometría infrarroja transformada de fourier (FTIR)

Para el análisis del tratamiento B se obtuvieron bandas iguales en las tres repeticiones del material.

Ilustración 9: FTIR TB (Ilustración propia)



El espectro FTIR del tratamiento B muestra un perfil muy similar al del tratamiento A (microcelulosa pura), con las mismas bandas características:

3400 cm^{-1} : banda ancha de estretching O–H (hidroxilos de la celulosa), 2900 cm^{-1} : estretching C–H (grupos metileno), 1000–1100 cm^{-1} : bandas intensas de estretching C–O y C–C (enlaces glicosídicos de la celulosa).

La repetición idéntica de las tres gráficas indica que el tratamiento B no generó cambios químicos detectables en la microcelulosa, o que el efecto es exactamente reproducible.

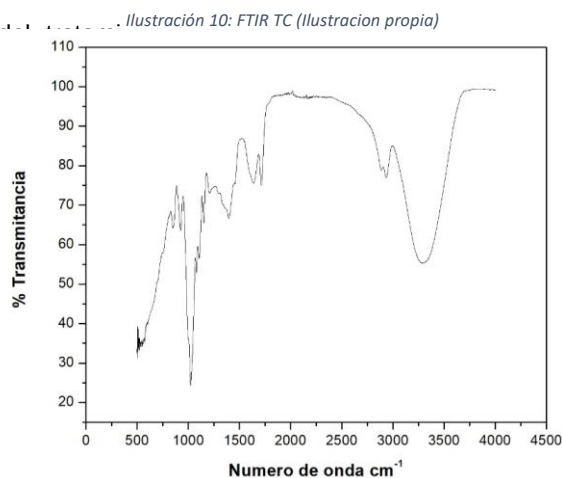
Comparando con el tratamiento A:

Similitud: ambos espectros son prácticamente iguales, sugiriendo que ni A ni B alteran significativamente la estructura química de la microcelulosa.

Diferencias: no se observan picos nuevos o desplazamientos, lo que implica que no hay funcionalización o degradación evidente.

7.3.6 Análisis de en TC R1, R2, R3 con espectrofotometría infrarroja transformada de fourier (FTIR)

Para el análisis
repeticiones de



s tres

El tratamiento C podemos observar que se identifican las bandas de absorción (mínimos en %Transmitancia): los picos principales están alrededor de 1000 cm^{-1} , 1600 cm^{-1} y una banda ancha cerca de 3400 cm^{-1} .

Asocia los números de onda con grupos funcionales:

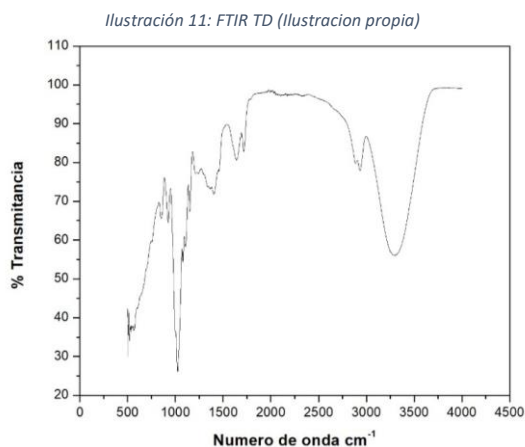
$3400 \text{ cm}^{-1} \rightarrow$ vibración O-H (alcoholes o agua).

$1600 \text{ cm}^{-1} \rightarrow$ posible enlace C=C o N-H.

$1000\text{--}1100 \text{ cm}^{-1} \rightarrow$ enlaces C-O o Si-O.

7.3.7 Análisis de en TD R1, R2, R3 con espectrofotometría infrarroja transformada de fourier (FTIR)

Para el análisis del tratamiento D se obtuvieron bandas iguales en las tres repeticiones del material.



El espectro FTIR del Tratamiento D muestra varias bandas de absorción en rangos como:

Banda ancha en $3400\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$: Vibración de estiramiento O-H, Bandas en $2900\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$: Vibraciones de estiramiento C-H de grupos metilo ($-\text{CH}_3$) y metileno ($-\text{CH}_2-$).

Banda en $1600\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$: Vibración de estiramiento C=C, sugiriendo compuestos aromáticos o insaturados.

Región $1200\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$: Bandas de deformación C-H y estiramiento C-O, típicas de compuestos fenólicos y terpenoides.

Bandas en $1000\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$: Vibraciones de estiramiento C-O, indicando ésteres, éteres o alcoholes.

7.4 Etapa 4: actividad microbiana

Evaluación de la calidad física y microbiológica de la carne de pollo almacenada en bioempaques antimicrobianos

7.4.1 Acondicionamiento de la carne de pollo

Se depositaron 15 g de pechuga de pollo previamente cortada en cuadros de 2x2 cm aproximadamente en los envases y posteriormente se introdujeron en bolsas Ziploc ® y fueron almacenadas en refrigeración a 4 °C (HR≈50%) por 7 días. Se realizaron muestreos a los 0, 2, 4 y 7 días para realizar los análisis que se describen a continuación.

7.4.2 Propiedades Físicas

7.4.1.1 Color y humedad de la carne

El análisis de color se determinó empleando un colorímetro Konica Minolta (Konica Minolta Sensing CR 400, Inc, Osaka, Japón) y se determinaron las variables de Luminosidad (L), cromaticidad a* y cromaticidad b*. Por otra parte, la humedad de la carne se realizó por el método 926.08 establecido por Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1980)

7.4.3 Actividad antibacteriana.

7.4.2.1 Difusión en Placa

La actividad antibacteriana se determinó por el método de difusión en placa bajo la metodología propuesta por Pandey et al. (2020) con algunas modificaciones. Se utilizaron los microorganismos *Staphylococcus aureus* 43300, *Escherichia coli* 25922 y *Bacillus subtilis*. Cada uno de los microorganismos se preparó a una concentración aproximada de 1×10^8 UFC/mL empleando como escala el nefelómetro de McFarland leyendo la absorbancia a 600 nm. Posteriormente se cortaron muestras del envase en forma de círculos de 5 mm de diámetro empleando una perforadora previamente esterilizada. Enseguida, se tomaron 100 µL de estas soluciones y se sembraron por el método de esparcimiento en placas de agar nutritivo (agar nutritivo, BD bioxon, Estado de México, México) a continuación se colocó en cada placa un círculo de cada tratamiento. Finalmente, las placas se incubaron a 37 °C aerobícamente (incubadora EQUATHERM modelo C1570, Curtin Matheson Scientific CMS, Inc, Houston Texas, USA). La actividad antibacteriana se

reportó en mm midiendo los halos de inhibición formados considerando el diámetro del envase.

7.4.4 Análisis microbiológico

La carne de pollo se inoculó con la bacteria *Staphylococcus aureus* 43300 empleando el nefelómetro de McFarland como se mencionó anteriormente. Posteriormente se pesó 1g de cada tratamiento y se homogenizó con 9 mL de diluyente de máxima recuperación (MRD, CM0733, Qoid, Basingstoke, Hampshire, Inglaterra) para obtener la dilución 1:10, posteriormente se realizaron diluciones seriadas hasta 10^6 . Posteriormente se sembraron 10 μ L en los medios por el método de siembra por estría. Para *Staphylococcus aureus* se empleó el agar Baird Parker enriquecido con emulsión de yema de huevo con telurito (base de agar Baird Parker, BD Bioxon, Estado de México) y para mesófilos aerobios totales se empleó agar el agar métodos estándar (agar para métodos estándar, MCD LAB, México) incubados a 37 °C por 48 y 24 h respectivamente.

7.4.5 Análisis estadístico

Para el análisis antibacteriano se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y una comparación de medias por Tukey usando el procedimiento GLM del software SAS 9.4, (SAS institute, Inc., 2023) en un diseño completamente al azar bajo el siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + E_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Variable de respuesta medida en la j-esima repetición j del tratamiento i

μ = Media general

T_i = Efecto del tratamiento

E_{ij} = Error aleatorio medido en la repetición j del tratamiento i

Para el efecto del envase en las características de la carne se realizó un factorial de dos vías, considerando como factores los tratamientos y el tiempo de almacenamiento, así como su interacción en un diseño completamente al azar usando para su análisis el procedimiento y software descrito anteriormente bajo el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + E_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Variable de respuesta medida en la observación k en el tratamiento i y el tiempo de almacenamiento j

μ = Media general

A_i = Efecto de los tratamientos i

B_j = efecto del tiempo de almacenamiento j

AB_{ij} = Efecto de la interacción del tratamiento i y el tiempo de almacenamiento j

E_{ijk} = error aleatorio medido en las observaciones k, en el tratamiento i y tiempo de almacenamiento j.

La Tabla 2 muestra la evolución de los parámetros de color L^* , a^* y b^* de la pechuga de pollo almacenada durante siete días bajo refrigeración en los diferentes empaques activos desarrollados. Tal como se observa, en todos los tratamientos el color inicial (día 0) fue estadísticamente homogéneo, lo que confirma que cualquier variación posterior se debe al tipo de empaque y a los procesos de deterioro asociados al almacenamiento.

Tabla 2: Atributos de color de pechuga de pollo almacenada aerobicamente a 4 °C en envases biodegradables a base de polisuccinimida

Días de almacenamiento	T1	T2	T3	T4
	L			
0	62.47 ± 1.46 ^{Aa}	62.47 ± 1.46 ^{Aa}	62.47 ± 1.46 ^{Aa}	62.47 ± 1.46 ^{Aa}
2	56.46 ± 5.09 ^{Aab}	59.33 ± 1.91 ^{Aab}	60.79 ± 1.96 ^{Aa}	57.39 ± 0.78 ^{Ab}

4	54.61 ± 0.51 ^{Bb}	58.05 ± 1.35 ^{Ab}	52.68 ± 0.49 ^{Bb}	58.82 ± 0.70 ^{Ab}
7	52.59 ± 0.49 ^{Cb}	56.39 ± 0.41 ^{Ab}	50.47 ± 0.36 ^{Db}	54.07 ± 0.76 ^{Bc}
a*				
0	1.63 ± 0.01 ^{Aa}	1.63 ± 0.01 ^{Ac}	1.63 ± 0.01 ^{Ac}	1.63 ± 0.01 ^{Ab}
2	0.73 ± 0.14 ^{Bb}	7.62 ± 2.05 ^{Aa}	3.56 ± 0.42 ^{Bb}	2.12 ± 0.81 ^{Bb}
4	0.53 ± 0.03 ^{Dc}	6.00 ± 0.17 ^{Aab}	4.93 ± 0.55 ^{Ba}	3.39 ± 0.43 ^{Ca}
7	0.37 ± 0.02 ^{Dc}	4.33 ± 0.39 ^{Abc}	3.55 ± 0.31 ^{Bb}	2.11 ± 0.11 ^{Cb}
b*				
0	16.01 ± 1.91 ^{Ac}	16.01 ± 1.91 ^{Ab}	16.01 ± 1.91 ^{Ac}	16.01 ± 1.91 ^{Ab}
2	20.88 ± 1.24 ^{Ab}	23.49 ± 1.84 ^{Aa}	19.19 ± 1.20 ^{Abc}	24.09 ± 2.84 ^{Aa}
4	23.28 ± 0.22 ^{Bb}	23.01 ± 0.14 ^{Ba}	22.37 ± 1.52 ^{Bb}	25.83 ± 0.36 ^{Aa}
7	26.72 ± 0.47 ^{Ba}	25.45 ± 0.09 ^{Ca}	26.25 ± 0.13 ^{BCa}	28.55 ± 0.36 ^{Aa}

(Elaboración propia) 2: Los valores representan la media ± desviación estándar. ^{A-D} Valores con diferentes superíndices en la misma fila indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos por día. ^{a-c} Valores con diferentes superíndices en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre el mismo tratamiento en los diferentes días de muestreo.

El parámetro L* mostró una disminución progresiva en todos los tratamientos, fenómeno común en carne aviar almacenada en refrigeración debido a la pérdida de humedad superficial y a cambios en la reflectancia del músculo. Sin embargo, la magnitud del descenso varió significativamente entre tratamientos.

Desde el día 2, los empaques activos con aceite esencial de orégano (T1 y T2) mostraron **mayores valores de L*** respecto a los tratamientos sin AEO (T3 y T4). Esta tendencia indica una preservación superior de la luminosidad cuando el AEO está presente, lo cual puede atribuirse a su capacidad de **inhibir microorganismos deteriorantes** que aceleran la desnaturalización proteica y la pérdida de brillo del músculo (Fang et al., 2022; Nisar et al., 2021).

Asimismo, el tratamiento con microcelulosa acetilada y AEO (T2) mantuvo la luminosidad más alta a lo largo del almacenamiento. La acetilación de la microcelulosa incrementa la hidrofobicidad de la matriz, reduciendo la migración de agua hacia el exterior y favoreciendo una superficie más estable, que refleja mayor luminosidad (Habibi, 2020; Espinoza-Acosta et al., 2021). Esta combinación sinérgica explica por qué **T2 mostró el deterioro más lento en términos de oscurecimiento**.

En contraste, T3 y T4 (sin AEO) presentaron la caída más marcada de L*, especialmente al día 7, reflejando mayor deshidratación y alteraciones estructurales por actividad microbiana.

En carne de pollo, los valores de a* son bajos debido a su escaso contenido de mioglobina; sin embargo, variaciones significativas indican reacciones de oxidación y la presencia de pigmentos asociados al deterioro.

Los datos muestran que T2 presentó los valores de a* más altos durante el almacenamiento, seguidos por T3 y T4, mientras que T1 mostró una disminución más marcada. El aumento moderado de a* en T2 puede estar relacionado con una **menor oxidación del músculo**, pues se ha demostrado que matrices biopoliméricas reforzadas y con agentes activos reducen la velocidad de formación de pigmentos indeseables (Buazzi et al., 2023). El AEO contiene compuestos fenólicos como **carvacrol y timol**, conocidos antioxidantes naturales que pueden proteger parcialmente los pigmentos musculares.

El comportamiento de T1 (microcelulosa nativa + AEO), aunque con efecto antimicrobiano, mostró menor estabilidad comparado con T2, lo cual refuerza la idea de que la **acetilación mejora la estructura del biocompósito**, favoreciendo la retención de compuestos volátiles del AEO y aumentando su eficacia (Kumar & Sharma, 2023; Santos et al., 2021).

El parámetro b* mostró un incremento significativo en todos los tratamientos conforme avanzó el almacenamiento. El aumento de b* es un indicador de **oxidación lipídica** y de concentración de cromóforos asociados al deterioro (Fang et al., 2022).

Sin embargo, el tratamiento T2 nuevamente mostró incrementos más moderados comparado con T3 y T4, lo cual sugiere que la microcelulosa acetilada reduce la exposición del músculo al oxígeno y el AEO inhibe microorganismos que aceleran la oxidación.

Estos resultados coinciden con reportes donde la incorporación de aceites esenciales y biocompuestos modificados disminuyen la velocidad de amarillamiento en carne fresca (Nisar et al., 2021).

El tratamiento T4 presentó valores altos de b^* , lo que indica que aunque la acetilación mejora la barrera a humedad, **no controla la oxidación ni el metabolismo microbiano**, y por ende su efecto aislado es limitado.

Por lo anterior se puede apreciar que **T2 fue el tratamiento más efectivo** en la preservación de los atributos de color, mientras que la ausencia del AEO (T3 y T4) aceleró cambios característicos de deterioro.

Estos hallazgos son consistentes con trabajos recientes que han demostrado que los empaques activos basados en biopolímeros y aceites esenciales mejoran la estabilidad del color en productos cárnicos (Fang et al., 2022; Buazzi et al., 2023), y que la modificación química de fibras naturales potencia el desempeño estructural de los biocompuestos (Habibi, 2020; Espinoza-Acosta et al., 2021).

El comportamiento de la humedad observado en la carne de pollo durante el almacenamiento refleja la interacción entre las propiedades funcionales de los empaques activos y los procesos bioquímicos naturales de la carne bajo refrigeración. En todos los tratamientos se presentó una disminución progresiva de la humedad, fenómeno ampliamente descrito como consecuencia de la desnaturalización parcial de proteínas y del deterioro estructural postmortem que facilita la liberación de agua hacia el exterior del tejido, como se presenta en la tabla 3. Sin embargo, la magnitud de esta pérdida fue **significativamente diferente** entre tratamientos, lo que confirma el impacto del tipo de microcelulosa y del aceite esencial de orégano (AEO) en la capacidad del empaque para **modular la transferencia de humedad**.

Tabla 3: Humedad (%) de la pechuga de pollo almacenada aerobicamente a 4 °C en envases biodegradables a base de polisuccinimida.

Días de almacenamiento	T1	T2	T3	T4
------------------------	----	----	----	----

0	74.46 ± 1.42 ^{Aa}	74.46 ± 1.42 ^{Aa}	74.46 ± 1.42 ^{Aa}	74.46 ± 1.42 ^{Aa}
2	68.53 ± 0.66 ^{Bb}	71.63 ± 0.24 ^{Ab}	66.54 ± 1.50 ^{BCb}	65.86 ± 0.57 ^{Cb}
4	66.41 ± 1.11 ^{Abc}	65.52 ± 0.16 ^{Ab}	65.38 ± 0.18 ^{Ac}	64.51 ± 0.19 ^{Bbc}
7	64.26 ± 0.63 ^{Bc}	65.67 ± 0.23 ^{Ab}	63.52 ± 0.50 ^{Bc}	63.46 ± 0.31 ^{Bc}

(Elaboración propia) 3: Los valores representan la media ± desviación estándar. ^{A-C} Valores con diferentes superíndices en la misma fila indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos por día. ^{a-c} Valores con diferentes superíndices en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre el mismo tratamiento en los diferentes días de muestreo.

El tratamiento T2 mostró la mejor retención de humedad a lo largo de los 7 días. Esta ventaja puede explicarse por la **sinergia funcional** entre ambos componentes (AEO y MCA), dado que la acetilación incrementa la hidrofobicidad de la celulosa al reemplazar grupos hidroxilo por grupos acetilo. Este cambio estructural disminuye la afinidad por el agua y reduce la permeabilidad del material, generando un **biocompósito menos susceptible a la migración de humedad**. Estudios recientes confirman que la acetilación mejora las propiedades de barrera y disminuye la sorción de agua en biocompuestos destinados a aplicaciones alimentarias (Habibi, 2020; Espinoza-Acosta et al., 2021).

Por otro lado el AEO actúa como agente antimicrobiano natural, reduciendo el crecimiento de bacterias deteriorantes que aceleran la desestructuración del músculo. Menor actividad microbiana implica **menor liberación de exudados**, ya que se conserva la integridad proteica superficial por más tiempo. Este efecto ha sido reportado en diversos empaques activos donde los aceites esenciales disminuyen el deterioro físico y químico de carnes frescas (Fang et al., 2022; Nisar et al., 2021).

Los tratamientos T1 y T2, que incorporan AEO, mostraron consistentemente valores de humedad superiores a los de T3 y T4 (sin AEO). Este patrón indica que el aceite esencial no solo ejerce actividad antimicrobiana, sino que también contribuye indirectamente a **preservar la retención de agua** al disminuir la proteólisis asociada al crecimiento microbiano. La disminución de la actividad bacteriana reduce la producción de metabolitos que afectan la integridad miofibrilar, lo cual coincide con reportes donde aceites esenciales ayudaron a mantener jugosidad y

apariencia en carne de pollo y res durante almacenamiento en frío (Buazzi et al., 2023).

El análisis entre T1–T3 (microcelulosa nativa) y T2–T4 (microcelulosa acetilada) muestra que la variante acetilada ofrece ventajas incluso en ausencia de AEO (como en T4), lo cual confirma su contribución a la **reducción de permeabilidad al agua**. Esta propiedad es fundamental en sistemas de empaque destinados a minimizar la deshidratación superficial de productos cárnicos. La literatura refiere que modificaciones químicas de la celulosa mejoran su hidrofobicidad y estabilidad mecánica, factores clave para limitar la transferencia de vapor y exudados (Kumar & Sharma, 2023; Santos et al., 2021).

No obstante, la ausencia de AEO en T4 provoca que, a pesar de su estructura más hidrofóbica, la carne experimente mayor deterioro microbiano y por ende una disminución marcada de humedad al final del almacenamiento.

Los resultados obtenidos evidencian que los biocompuestos desarrollados no actúan únicamente como barreras físicas, sino como **interfaces activas** que influyen directamente en la dinámica de deterioro del alimento. En este sentido, la matriz polimérica controla la permeabilidad y la transferencia de masa, el refuerzo (microcelulosa nativa o acetilada) contribuye a la estructura, rigidez y capacidad de sorción, así como el agente activo (AEO) que modula el crecimiento microbiano y preserva la integridad del tejido.

Este comportamiento concuerda con modelos recientes de empaques activos donde la combinación de biopolímeros + refuerzos naturales + antimicrobianos genera efectos complementarios en la preservación de carne fresca (Fang et al., 2022).

La interacción entre ambas propiedades explica la estabilidad de humedad observada en T2, lo que sugiere un comportamiento funcional ideal para aplicaciones en productos cárnicos.

El análisis de difusión en placa permitió evaluar la capacidad antimicrobiana de los empaques activos elaborados con polisuccinimida, microcelulosa (nativa o acetilada) y aceite esencial de orégano (AEO). Los resultados presentados en la tabla 4 mostraron claramente que solo los tratamientos que contenían AEO (T1 y T2) generaron halos de inhibición frente a *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Bacillus subtilis*, mientras que las formulaciones sin agente activo (T3 y T4) no mostraron actividad antimicrobiana (N/A).

Tabla 4: Propiedades antibacterianas de los envases a base de polisuccinimida.

Tratamiento	<i>S. aureus</i>	<i>E. coli</i>	<i>B. subtilis</i>
T1	20.0 ± 0.01 ^a	7.5 ± 2.5 ^a	15.6 ± 0.57 ^a
T2	21.6 ± 1.52 ^a	7.5 ± 2.5 ^a	15.0 ± 0.01 ^a
T3	N/A	N/A	N/A
T4	N/A	N/A	N/A

(Elaboración propia) 4: Los valores representan la media ± desviación estándar. las mismas literales entre columnas indican que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0.05$).

En cuanto a la actividad contra *Staphylococcus aureus* es posible apreciar que los halos de inhibición fueron de 20.0 ± 0.01 mm para T1 y 21.6 ± 1.52 mm para T2, sin diferencias significativas entre ellos ($p > 0.05$). Estos valores indican una fuerte sensibilidad de *S. aureus* al aceite esencial de orégano, lo cual es consistente con reportes previos que señalan que los compuestos fenólicos —principalmente carvacrol y timol— desintegran rápidamente la membrana citoplasmática de bacterias Gram positivas, modifican la permeabilidad e inducen pérdida de iones esenciales (Ultee & Smid, 2001; Nostro & Papalia, 2012).

El hecho de que no existan diferencias entre T1 y T2 sugiere que, en condiciones in vitro, la microcelulosa acetilada no afecta la difusión del compuesto activo a través del agar. Es decir, tanto el biocompuesto con microcelulosa nativa como el acetilado liberan cantidades suficientes de AEO para inhibir de manera similar a *S. aureus*.

Ambos tratamientos activos (T1 y T2) generaron halos de 7.5 ± 2.5 mm, lo que indica una actividad inhibitoria menor en comparación con *S. aureus*. Este resultado es coherente con la estructura de Gram negativas como *E. coli*, cuya membrana

externa rica en lipopolisacáridos dificulta la penetración de compuestos hidrofóbicos como los aceites esenciales (Burt, 2004; Hyldgaard et al., 2012).

A pesar de ello, la presencia de halos confirma que el AEO es capaz de atravesar parcialmente esta barrera, afectando la integridad celular y reduciendo el crecimiento bacteriano. El tamaño moderado de los halos también coincide con estudios que señalan que la susceptibilidad de *E. coli* a aceites esenciales es altamente dependiente de la concentración y del mecanismo de liberación (Faleiro, 2011).

En cuanto a la actividad contra *Bacillus subtilis* los halos obtenidos fueron de 15.6 ± 0.57 mm en T1 y 15.0 ± 0.01 mm en T2, también sin diferencias entre tratamientos. *B. subtilis*, a pesar de su capacidad para formar esporas, mostró una clara inhibición, lo cual es característico de especies Gram positivas cuya membrana carece de la barrera externa presente en Gram negativas, facilitando la acción de monoterpenos del AEO (Carson et al., 2006).

Estos valores son particularmente relevantes porque demuestran que el AEO no solo actúa sobre bacterias mesófilas vegetativas, sino también sobre microorganismos más resistentes, lo cual puede contribuir a mejorar la inocuidad de productos cárnicos almacenados.

La ausencia de diferencias estadísticas entre los tratamientos con AEO sugiere que la acetilación **no influye en la difusión radial del aceite** durante la prueba de agar, ya que esta técnica depende mayormente de la movilidad del compuesto activo y no del soporte. No obstante, estudios recientes indican que la acetilación **sí afecta la liberación del AEO en matrices alimentarias**, ya que mejora la compatibilidad entre el aceite y el biocompósito y permite una liberación más lenta y controlada (Li et al., 2021; Chotphruethipong et al., 2020).

En cuanto al comportamiento sobre el deterioro de la carne de pollo almacenada en empaques activos a base de polisuccinimida reforzada con microcelulosa, variando en el tipo de microcelulosa y la presencia del aceite esencial de orégano (AEO), se puede apreciar en la tabla 5 que los tratamientos T1–T2 evalúan el

efecto antimicrobiano del AEO, mientras que T3–T4 permiten evaluar la influencia de la microcelulosa sin agente activo sobre el crecimiento microbiano.

Tabla 5: Análisis microbiológico (Log10 UFC/g) de pechuga de pollo almacenada aerobíamente a 4 °C en envases biodegradables a base de polisuccinimida.

Días de almacenamiento	T1	T2	T3	T4
Mesófilos aerobios totales				
0	8.93 ± 0.02 ^{Ac}	8.93 ± 0.02 ^{Ad}	8.93 ± 0.02 ^{Ad}	8.93 ± 0.02 ^{Ad}
2	9.17 ± 0.02 ^{Cb}	9.06 ± 0.07 ^{Cc}	9.35 ± 0.03 ^{Bc}	9.49 ± 0.02 ^{Ac}
4	9.20 ± 0.02 ^{Cb}	9.24 ± 0.01 ^{Cb}	9.50 ± 0.02 ^{Bb}	9.63 ± 0.01 ^{Ab}
7	9.36 ± 0.02 ^{Ca}	9.42 ± 0.02 ^{Ca}	9.63 ± 0.02 ^{Ba}	9.72 ± 0.01 ^{Aa}
<i>Staphylococcus aureus</i>				
0	8.01 ± 0.06 ^{Ac}	8.01 ± 0.06 ^{Ac}	8.01 ± 0.06 ^{Ad}	8.01 ± 0.06 ^{Ad}
2	8.12 ± 0.07 ^{Bc}	8.10 ± 0.09 ^{Bc}	8.42 ± 0.03 ^{Ac}	8.46 ± 0.01 ^{Ac}
4	8.32 ± 0.02 ^{Bb}	8.26 ± 0.01 ^{Bb}	8.55 ± 0.04 ^{Ab}	8.62 ± 0.02 ^{Ab}
7	8.48 ± 0.02 ^{Ba}	8.52 ± 0.01 ^{Ba}	8.75 ± 0.01 ^{Aa}	8.79 ± 0.01 ^{Aa}

Los valores representan la media ± desviación estándar. ^{A-C} Valores con diferentes superíndices en la misma fila indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos por día. ^{a-c} Valores con diferentes superíndices en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre el mismo tratamiento en los diferentes días de muestreo.

En cuanto al atributo de mesófilos aerobios totales los valores iniciales fueron homogéneos entre tratamientos (**8.93 Log CFU/g**) confirmando que las diferencias posteriores se deben al tipo de empaque.

Desde el día 2, los tratamientos sin AEO mostraron un incremento más acelerado, alcanzando, **T3** 9.35 Log, **T4** 9.49 Log, en comparación, T1 y T2 presentaron valores menores de 9.17 Log y 9.06 Log, respectivamente manteniendo esta tendencia durante el almacenamiento, llegando Al día 7 a presentar los valores de **T1** 9.36 Log, **T2** 9.42 Log, **T3** 9.63 Log y **T4** 9.72 Log. Mostrando que T1 y T2 retardaron el crecimiento microbiano, mientras que T3 y T4 alcanzaron las mayores poblaciones bacterianas.

Para el caso de *S. aureus* los valores iniciales (**8.01 Log CFU/g**) también fueron homogéneos. A lo largo del almacenamiento, los tratamientos sin AEO presentaron aumentos significativamente mayores al día 7 alcanzando en **T3** 8.75 Log y en **T4**: 8.79 Log, mientras que los empaques con AEO mostraron menor proliferación con **T1** 8.48 Log y **T2**: 8.52 Log, lo que representa una disminución de alrededor de 0.3 ciclos logarítmicos para los primeros 7 días de almacenamiento, con esto se

confirma el efecto inhibitorio del AEO específicamente sobre bacterias Gram positivas.

Los tratamientos T1 y T2, que contienen aceite esencial de orégano, mostraron consistentemente menores recuentos microbianos para mesófilos aerobios y para *S. aureus*. El AEO contiene principalmente carvacrol y timol, compuestos capaces de alterar la permeabilidad de membranas, desestabilizar gradientes de protones, inhibir la síntesis de ATP, y causar lisis celular en bacterias sensibles.

Esto explica que, al día 7, T1 y T2 mantuvieran poblaciones microbianas menores en comparación con T3 y T4, demostrando un efecto inhibitorio sostenido. Estudios recientes han reportado efectos similares en matrices cárnicas embebidas con aceites esenciales (Olmedo et al., 2020; Rodríguez-Melcón et al., 2022).

En cuanto a las diferencias presentadas entre T1 y T2 en lo referente al rol de la microcelulosa acetilada se puede decir que aunque T1 y T2 mostraron valores estadísticamente similares, T2 tendió a mostrar menores poblaciones en las primeras etapas (día 2) tanto para mesófilos (9.06 vs. 9.17 Log) como para *S. aureus* (8.10 vs. 8.12 Log). La literatura sugiere que la microcelulosa acetilada: retiene mejor compuestos hidrofóbicos como el AEO, reduce la volatilización inicial, permite una liberación más gradual del agente antimicrobiano, y mejora la compatibilidad con matrices poliméricas (Li et al., 2021), con lo cual se explicaría la ligera ventaja observada en T2 durante los primeros días.

En lo que se refiere al crecimiento acelerado en los controles (T3 y T4), se evidencia que los tratamientos sin AEO mostraron las mayores poblaciones microbianas tanto para mesófilos, en el día 7 para el T4 9.72 Log y en *S. aureus* para el día 7 en el T4 8.79 Log

Este comportamiento es esperado, ya que la microcelulosa nativa o acetilada no posee actividad antimicrobiana intrínseca. Además, los biopolímeros pueden retener algo de humedad, lo que en presencia de nutrientes contribuye al crecimiento microbiano (Khan et al., 2022).

T4 mostró los valores más altos, lo que podría deberse a que la estructura más hidrofóbica del material acetilado favorece una superficie menos interactiva con el AEO en ausencia del agente activo, permitiendo mayor proliferación bacteriana. Asimismo en relación con efectos observados en humedad y color el menor crecimiento bacteriano en T1 y T2 concuerda con los resultados previos de mayor retención de humedad en T2 por lo tanto menor deterioro microbiano y menores variaciones de color en tratamientos con AEO. La acción antimicrobiana retrasa procesos degradativos como proteólisis, oxidación lipídica, pérdida de agua, y formación de cromóforos asociados al deterioro.

Estos hallazgos son consistentes con modelos de empaques activos que emplean aceites esenciales en biopolímeros (da Silva et al., 2021; Kalantari et al., 2023).

8. CONCLUSIONES

El aceite esencial de orégano es el principal responsable del efecto antimicrobiano del empaque dado que los tratamientos que incorporaron AEO (T1 y T2) mostraron

actividad antimicrobiana significativa frente a *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Bacillus subtilis*, mientras que los empaques sin agente activo (T3 y T4) no presentaron halos de inhibición. Esto confirma la naturaleza activa del sistema y evidencia el potencial del AEO como compuesto antimicrobiano natural para aplicaciones alimentarias.

Los empaques activos redujeron el crecimiento microbiano durante el almacenamiento, pudiéndose apreciar que T1 y T2 presentaron menores poblaciones de mesófilos aerobios totales y de *S. aureus* respecto a los controles. Este efecto inhibitorio contribuyó a retrasar el deterioro microbiológico del producto y demuestra que la incorporación del AEO en la matriz de polisuccinimida es funcional y efectiva para mejorar la seguridad microbiológica de la carne de pollo.

El tratamiento con microcelulosa acetilada y AEO (T2) mostró el mejor desempeño integral al presentar mayor retención de humedad, menores alteraciones en los parámetros de color (L, a, b), y tendencia a un crecimiento microbiano más lento en etapas tempranas, lo cual sugiere que la acetilación mejora la estructura del biocompósito, favoreciendo la compatibilidad con el AEO, su retención inicial y su liberación gradual.

Los empaques sin AEO (T3 y T4) no brindan protección antimicrobiana ni mejoras significativas en la estabilidad del producto, ya que ambos tratamientos mostraron los mayores valores microbianos y las pérdidas más marcadas en humedad y color, demostrando que la microcelulosa, por sí sola, no posee efecto antimicrobiano, y que las modificaciones químicas (como la acetilación) no sustituyen la necesidad de incorporar un agente activo cuando se pretende extender la vida útil.

El uso conjunto de biopolímeros modificados y compuestos naturales es una estrategia eficaz de conservación debido a que el sistema de empaque desarrollado demuestra que es posible combinar un biopolímero base (polisuccinimida), refuerzos de microcelulosa modificaciones químicas (acetilación), y agentes naturales antimicrobianos (AEO) para generar un material con propiedades funcionales mejoradas capaces de preservar atributos de calidad (humedad, color) y retrasar el deterioro microbiano de carne fresca.

Los resultados sugieren que los empaques biodegradables desarrollados, especialmente el tratamiento T2, son una alternativa viable para reducir el uso de empaques sintéticos, extender la vida útil de productos cárnicos, disminuir el deterioro microbiológico, y responder a la demanda de empaques sostenibles y funcionales.

9. LITERATURA CITADA

- ISO. (2013). *Packaging and the environment — General requirements for the use of ISO standards in the field of packaging and the environment (ISO 18601)*. International Organization for Standardization.

- Lockhart, H. (1997). *Fundamentals of Packaging*. Institute of Packaging Professionals.
- Paine, F. (2012). *The Packaging User's Handbook*. Springer Science & Business Media.
- soroka, W. (2002). *Fundamentals of Packaging Technology*. Institute of Packaging Professionals.

Yam, K. L., Takhistov, P., & Miltz, J. (2005). Intelligent packaging: Concepts and applications. *Journal of Food Science*, 70(1), R1–R10.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb09052.x>

Gañán, P., Zuluaga, R., Castro, C., Restrepo-Osorio, A., Velásquez Cock, J., Osorio, M., Montoya, Úrsula, Vélez, L., Álvarez, C., Correa, C., & Molina, C. (2017). Celulosa: un polímero de siempre con mucho futuro. *Revista Colombiana De Materiales*, (11), 1–4. <https://doi.org/10.17533/udea.rcm.328779>

- **Referencias de Definición de antimicrobianos**

- Abdalbasit, A. M. (2016). Effect of Essential Oils on Organoleptic (Smell, Taste, and Texture) Properties of Food. *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety*, 131-137. 10.1016/B978-0-12-4166417.00013-4. doi:
- Adelakun, O. E., Oyelade, O. J., Olanipekun, B. F. (2016). Use of Essential Oils in Food Preservation. *Food Preservative Effects of Essential Oils*, 71-84. doi: 10.1016/B978-0-12-4166417.00007-9.
- Brochot, A., Guilbot, A., Haddioui, L. & Roques, C. (2017). Antibacterial, antifungal, and antiviral effects of three essential oils. *MicrobiologyOpen*; 00e459: 1-6. doi: 10.1002/mbo3.459
- Sorheim O., Nissen H. 2008. Tecnología actual para el empaque de carne con atmósferas modificadas. *Mundo Lácteo y Cárnico*. 10- 14 pp (**conservación de productos cárnicos**)
- Choi, J., Kong, B., Bowker, BC, Zhuang, H. y Kim, WK (2023). Estrategias nutricionales para mejorar la calidad y la composición de la carne en las difíciles condiciones de la producción de pollos de engorde: Una revisión. *Animals* , 13 (8), 1386. <https://doi.org/10.3390/ani13081386> (**5.1 Carne de pollo definición demanda consumo principales**), (**5.2 peligros, deterioro y agentes corruptores**)
- Consejo Mexicano de la Carne (Comecarne). (2024). *Situación actual de la industria cárnica en México 2024*. <https://comecarne.org/> Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). *Meat and meat products: Poultry meat*. FAO Statistics Division. <https://www.fao.org/statistics> (**5.3 condiciones de almacenamiento transporte y envasado.**)
- Buazzi, M. M., et al. (2023). *Release kinetics of essential oils from bio-based composites for food packaging*. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11, 1452–1464.
- Espinoza-Acosta, J. L., et al. (2021). Lignocellulosic fibers in biocomposite packaging. *Industrial Crops & Products*, 171, 113892.
- Fang, Z., et al. (2022). Active antimicrobial packaging based on biopolymers and natural extracts. *Food Hydrocolloids*, 129, 107608.

- Habibi, Y. (2020). Key advances in the eco-friendly design of cellulose nanocomposites. **Chemical Society Reviews**, **49**, 4421–4465.
- Kumar, A., & Sharma, K. (2023). Biobased composite materials for sustainable packaging applications. **Journal of Cleaner Production**, **382**, 135375.
- Mohanty, A. K., et al. (2020). *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. CRC Press.
- Nisar, T., et al. (2021). A review on antimicrobial biopolymers for food packaging. **Trends in Food Science & Technology**, **108**, 238–254.
- Santos, S. F., et al. (2021). Biocomposites: Properties and applications in packaging. **Carbohydrate Polymers**, **260**, 117794.
- Buazzi, M. M., et al. (2023). Release kinetics of essential oils from bio-based composites for food packaging. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **11**(3), 1452–1464.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c07087>
- Espinoza-Acosta, J. L., et al. (2021). Lignocellulosic fibers in biocomposite packaging. *Industrial Crops & Products*, **171**, 113892.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113892>
- Fang, Z., et al. (2022). Active antimicrobial packaging based on biopolymers and natural extracts. *Food Hydrocolloids*, **129**, 107608.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107608>
- Habibi, Y. (2020). Key advances in the eco-friendly design of cellulose nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, **49**(13), 4421–4465.
<https://doi.org/10.1039/C9CS00496J>
- Kumar, A., & Sharma, K. (2023). Biobased composite materials for sustainable packaging applications. *Journal of Cleaner Production*, **382**, 135375.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135375>
- Nisar, T., et al. (2021). A review on antimicrobial biopolymers for food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, **108**, 238–254.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.015>
- Santos, S. F., et al. (2021). Biocomposites: Properties and applications in packaging. *Carbohydrate Polymers*, **260**, 117794.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117794>
- Buazzi, M. M., et al. (2023). Release kinetics of essential oils from bio-based composites for food packaging. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **11**(3), 1452–1464.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c07087>
- Espinoza-Acosta, J. L., et al. (2021). Lignocellulosic fibers in biocomposite packaging. *Industrial Crops & Products*, **171**, 113892.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113892>
- Fang, Z., et al. (2022). Active antimicrobial packaging based on biopolymers and natural extracts. *Food Hydrocolloids*, **129**, 107608.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107608>
- Habibi, Y. (2020). Key advances in the eco-friendly design of cellulose nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, **49**(13), 4421–4465.
<https://doi.org/10.1039/C9CS00496J>

- **Kumar, A., & Sharma, K. (2023).** Biobased composite materials for sustainable packaging applications. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135375>
- **Nisar, T., et al. (2021).** A review on antimicrobial biopolymers for food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 108, 238–254. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.015>
- **Santos, S. F., et al. (2021).** Biocomposites: Properties and applications in packaging. *Carbohydrate Polymers*, 260, 117794. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117794>
- Burt, S. (2004). Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods—a review. *International Journal of Food Microbiology*, 94, 223–253.
- Carson, C. F., Mee, B. J., & Riley, T. V. (2006). Mechanism of action of Melaleuca alternifolia (tea tree) oil on *Staphylococcus aureus*. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(12), 4963–4968.
- Chotphruethipong, L., Benjakul, S., & Kijroongrojana, K. (2020). Release characteristics and antimicrobial activity of essential oils incorporated in biodegradable films. *Food Packaging and Shelf Life*, 23, 100464.
- Faleiro, M. L. (2011). The mode of antibacterial action of essential oils. *Science Against Microbial Pathogens*, 1143–1156.
- García, E., López, D., & Rojas, G. (2022). Cellulose-based biocomposites for active food packaging: Functional properties and applications. *Food Research International*, 155, 111102.
- Hyldgaard, M., Mygind, T., & Meyer, R. L. (2012). Essential oils in food preservation: mode of action, synergies, and interactions. *Frontiers in Microbiology*, 3, 12.
- Li, X., Ko, J., & Park, H. (2021). Controlled release of essential oils from biopolymer-based films: Effects of chemical modification and film structure. *Carbohydrate Polymers*, 256, 117555.
- Nostro, A., & Papalia, T. (2012). Antimicrobial activity of carvacrol: Current progress and future prospects. *Journal of Applied Microbiology*, 113(6), 1234–1243.
- Ultee, A., & Smid, E. J. (2001). Influence of carvacrol on growth and morphology of *Staphylococcus aureus*. *Journal of Applied Microbiology*, 91(4), 493–501.
- da Silva, J. B., Oliveira, T. L. C., & Ribeiro, J. S. (2021). Essential oils in biodegradable active packaging: Antimicrobial and antioxidant effects in meat products. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100666.
- Hyldgaard, M., Mygind, T., & Meyer, R. L. (2012). Essential oils in food preservation: Mode of action and applications. *Frontiers in Microbiology*, 3, 12.
- Khan, M. I., et al. (2022). Influence of biopolymer packaging on microbial growth dynamics in refrigerated poultry meat. *Journal of Food Protection*, 85(4), 585–593.
- Kalantari, S., et al. (2023). Active packaging films based on natural antimicrobials for meat preservation: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 141, 103212.
- Li, X., Ko, J., & Park, H. (2021). Controlled release of essential oils from chemically modified biopolymer films. *Carbohydrate Polymers*, 256, 117555.

- Olmedo, R. H., Nepote, V., & Grosso, N. R. (2020). Preservation of chicken meat using edible coatings with essential oils: Microbial and chemical effects. *Journal of Food Science*, 85(3), 698–708.
- Rodríguez-Melcón, C., et al. (2022). Oregano essential oil for shelf-life extension of poultry products: Mechanisms and applications. *Food Control*, 138, 108986.

10. ANEXOS