

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”
División de Ciencia Animal
Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos



**Evaluación del deterioro fisicoquímico y microbiano de la
carne de cerdo envasada en empaques activos biodegradables
funcionalizados con aceite esencial de orégano**

POR:

Edwin Ismael Hernández Sánchez

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

Junio de 2026

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

Departamento de ciencia y tecnología de alimentos

Evaluación del deterioro fisicoquímico y microbiano de la carne de cerdo envasado en empaques activos biodegradables funcionalizados con aceite esencial de orégano.

TESIS

Presentada por:

Hernandez Sanchez Edwin Ismael

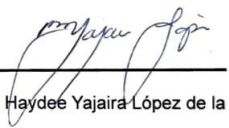
Que somete a consideración de H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título profesional de

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

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



Dra. María Hernández Gonzales
Asesor principal



Dra. Haydee Yajaira López de la Peña
Co-Asesor



Dr. Francisco Hernández Centeno
Co-Asesor



Mc. Ignacio Antonio Hernández Pérez
Co-Asesor Externo



MC. Pedro Carrillo López
Coordinador de la división de ciencia animal
Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio 2026

Declaración de no plagio

El autor, quien es responsable directo, jura bajo protesta de decir la verdad, que no 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 prestados los datos o la tesis para presentarla como copia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin comillas; utilizar material digital como imágenes, videos, 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 responsabilizo de las consecuencias generadas en caso de existir cualquier tipo de plagio y declaró que este trabajo es original.



Edwin Ismael Hernández Sánchez

DEDICATORIAS

Dedicatorias

A mis padres el **Ing. Jaime Hernandez Calderon y la Lic. Margarita Sanchez González** por dejar que su niño cumpliera su sueño, por apoyarme y nunca rendirse en medio de todas las adversidades, por ser el fruto de mi dedicación. Son y serán siempre mi mayor ejemplo a seguir. Ustedes son el refugio que me recordara que rendirse no es una opción.

Si hoy sostengo este logro, es porque ustedes fueron el cimiento y la fuerza que me impulsaron a llegar a la meta. Son mi dedicación hecha realidad, mi mayor ejemplo de vida y, por encima de todo, el amor más grande, puro e infinito de mi existencia. Este título no es mío es nuestro.

A mis hermanos la **Ing. Ariadna Hernández Sánchez y Omar de Jesús Hernández Sánchez**, por ser mis cómplices durante toda mi vida, por acompañarme siempre, hemos crecido juntos de la mano del mejor ejemplo. Aunque el destino nos lleve por caminos separados, mi corazón siempre encontrará el camino de regreso al suyo. En cada triunfo mío, hay una parte de ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A mis padrinos y segundos padres **Bonifacio Hernández Ramírez y Marina Ayala Negrete** quienes abrieron las puertas de su hogar para convertirse en mi segunda casa. Gracias por brindarme no solo un espacio donde me sentí seguro, sino un apoyo incondicional que ha sido fundamental en mi formación. A quienes han sido mis ejemplos que seguir: gracias por su guía, por compartir su sabiduría y por ser los pilares que hicieron este camino más sencillo de transitar. Su paciencia y amor me han moldeado profesionalmente, pero, sobre todo, les agradezco por estar siempre presentes, teniendo siempre un lugar donde siempre fui recibido y nunca faltó mi plato en la mesa.

A mis abuelos **María Trinidad Calderon Tafoya e Ismael Hernández Ramírez**, por acompañarme desde mi niñez y ser un refugio y un lugar seguro, por cobijarme y brindar a mis hermanos y a mí su amor incondicional por ser el cimiento de mi historia y convertirme en la persona que soy hoy. Su hogar siempre fue para mis hermanos y para mí un refugio inquebrantable, un lugar seguro donde pudimos crecer bajo el abrigo de su sabiduría y su ternura. Gracias por cobijarnos bajo su cuidado y por demostrarnos, con cada gesto, que el amor incondicional es el regalo más grande que podemos recibir en la vida. Este logro también les pertenece a ustedes.

A mis tía **Fabiola Hernández Calderon** gracias por haber sido el vínculo constante con mis raíces durante todo el tiempo que estuve fuera de casa, tus palabras y tu cercanía me recordaron siempre el sabor y la calidez de nuestro hogar. Gracias por ser esa mujer valiente, de carácter firme y corazón generoso, que nos enseñó a mis hermanos y a mí que la determinación es clave en la vida, y que, para nosotros, ante los desafíos, un “no” jamás será una respuesta. Tu fortaleza ha sido una inspiración constante en mi camino.

A mis amigos **Ángel Gabriel Hernández, Diego Mireles, Ernesto Pelagio y Eduardo flores** por acompañarnos mutuamente en cada locura y hacer que el final del día sea una válvula de escape ante el estrés y los malos ratos.

A mis amigas **Hannaely Islas, Karen Vara, Isela Chaves, Alondra García, Camila García** por hacer que los días de clase pasarán más rápido, por ser mis amiguitas de generación y

5

nunca hacerme a un lado, por siempre estar y compartir no solo materias, sino recuerdos

de estrés y alegrías que siempre estarán en mi memoria.

A los doctores **María Hernández González, Haydee Yajaira López de la Peña y Francisco Hernández Centeno**, por su guía incondicional durante toda mi carrera universitaria. Gracias por ser un ejemplo de ética, excelencia y dedicación, por no solo enseñarme los fundamentos de nuestra profesión, sino por inspirarme a cuestionar, a investigar y a superar mis propios límites. Su mentoría fue la guía que me permitió sobrepasar los retos de esta etapa, ayudándome a descubrir no solo lo que soy capaz de hacer, sino también el profesional en el que deseo convertirme.

Al **MC. Ignacio Antonio Hernández Pérez** por su gran contribución en la elaboración de este proyecto, por su entrega y dedicación a nuestra “alma mater” y al DCTA por eso, gracias.

A mi **equipo de futbol americano universitario**, por ayudarme a sacar toda la frustración y estrés en cada entrenamiento. A los coach que me exigieron y fortalecieron mi trabajo en equipo y a la hermandad que hice con mis compañeros. “siempre juntos, hasta la victoria”

A mis amigos **Víctor Oziel Villanueva Blanco, Johan Yeniel Vergara, Eduardo Cortez Torres, Zariel Bracamontes Saldaña, Joaquin Vargas Barba, Edgar Issac Muñoz Romero, Isaac Alejandro López Madrueño y Manuel Antonio Burciaga Contreras** gracias por ser mis hermanos en esta etapa crucial de mi vida. Más que compañeros de carrera, se convirtieron en mi verdadera familia foránea; aquellos con quienes compartí, alegrías, tristezas y el apoyo incondicional en los días difíciles. Gracias por cada momento compartido, por las risas que aliviaron la carga y por hacer que la distancia de mi hogar fuera mucho más llevadera. Este camino no habría sido igual sin su complicidad y su hermandad, los llevo conmigo como uno de los tesoros más valiosos que me dejó la universidad.

CONTENIDO

DEDICATORIAS	5
AGRADECIMIENTOS	6
CONTENIDO.....	9
INDICE DE FIGURAS	12
INDICE DE TABLAS	13
RESÚMEN.....	14
1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. HIPÓTESIS	20
4. OBJETIVOS	21
4.1. General.....	21
4.2. Específicos.....	21
5. REVISIÓN DE LITERATURA	22
5.1 Empaque	22
5.1.1 Empaques tradicionales.....	22
5.1.2 Empaques biobasados.....	23
5.2 Biomateriales usos e importancia	24
5.2.1 Ventajas de su uso	24
5.2.2 Desventajas de su uso.....	24
5.3 Tipos de biomateriales	25
5.3.1 Polisuccinimida	25
5.3.2 Almidón.....	26
5.3.3 Celulosa.....	26
5.4 Biocompositos	28
5.4.1 Estructura y funcionamiento.....	28
5.4.2 Matriz polimérica biobasada.....	28
5.4.4 Reforzantes naturales.....	29
5.4.4. Aditivos funcionales (en empaques activos).....	29
5.5 Tendencias	30
5.5.1 Tendencias en envasado.....	30
5.6 Empacado activo	30
5.6.4 Atrapadores de oxígeno	32
5.6.5 Emisores.....	32
5.6.6 Antimicrobianos	32

5.7	Conservación de productos cárnicos	32
5.7.1	Técnicas de conservación.....	32
5.7.2	Carne de cerdo	34
5.7.2.1	Principales afecciones	34
5.7.2.2	Flora contaminante	34
5.7.2.3	Tasa de crecimiento rápida	34
6.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
6.1	Etapa 1.- Obtención de materiales base	36
6.1.3	Microcelulosa.....	37
6.1.4	Microcelulosa acetilada.....	37
6.2	Etapa 2.- Elaboración de empaques	38
6.2.2	Termoformado	39
6.3	Etapa 3.- Caracterización de los materiales obtenidos.....	40
	Etapa 4.- Evaluación de la actividad antimicrobiana	41
6.3.2	Acondicionamiento de la carne de cerdo	41
6.3.2.1	Propiedades Físicas.....	41
6.3.2.2	Análisis microbiológico.....	41
6.3.2.3	Actividad antimicrobiana contra flora mesofila ambiental	42
6.3.2.4	Análisis estadístico.....	43
7.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	44
7.1	Etapa 1: Caracterización de los materiales	44
7.4.4.	CARACTERIZACION QUIMICA FTIR	44
7.1.1.1.	Polisuccinimida	44
7.1.1.2.	Microcelulosa	45
7.1.1.3.	Aceite esencial de orégano	46
7.1.1.4.	Compositos.....	47
7.1.1.4.1.	Ta: MCS sin acetilar con AEO	47
7.1.1.4.2.	Tb: MCS acetilada con AEO.....	48
7.1.1.4.3.	Tc: MCS sin acetilar sin AEO	49
7.1.1.4.4.	TD: MCS acetilada sin AEO	50
7.4.4.	Características físicas del empaque.....	51
7.2	Etapa 2: Evaluación física.....	51
7.2.1	Análisis de humedad.....	51
7.2.2	Análisis de color.....	53
7.3	Etapa 3: Actividad microbiana.....	56
7.3.1	Evaluación de la actividad antimicrobiana contra patógenos alimentarios.....	56
8.	CONCLUSIONES.....	59
9.	LITERATURA CITADA	61

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Policondensación térmica PSi (elaboración propia)	36
Figura 2. Lavado y filtrado de MCA (elaboración propia)	38
Figura 3. Empaque tratamiento B (elaboración propia)	39
Figura 4. Dsecación de carne molida de cerdo (elaboración propia).....	41
Figura 5. Halo de inhibición en s. aureus tratamiento A	42
Figura 6 FTIR polisuccinimida representación de R1, R2 y R3 (elaboración propia)	45
Figura 7 FTIR de microcelulosa representación de R1, R2 y R3 (elaboración propia).....	46
Figura 8 FTIR Aceite Esencial de Orégano (elaboración propia)	47
Figura 9, tratamiento A representación (elaboración propia).....	48
Figura 10 tratamiento b representación de R1, R2, R3 (elaboración propia)	49
Figura 11 Tratamiento C representación de R1, R2 y R3 (elaboración propia).....	50
Figura 12 Tratamiento D representación de R1, R2 y R3.....	51

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables de tratamientos	38
Tabla 2. Humedad (%) de la carne molida de cerdo almacenada aeróbicamente a 4 °C en envases biodegradables a base de polisuccinimida (Elaboración propia).....	51
Tabla 3. Atributos de color de carne molida de cerdo almacenada aeróbicamente a 4 °C en envases biodegradables a base de polisuccinimida (Elaboración propia).....	54
Tabla 4. Análisis microbiológico (Log10 UFC/g) de carne molía de cerdo almacenada aeróbicamente a 4 °C en envases biodegradables a base de polisuccinimida.	56

RESÚMEN

El objetivo de la presente investigación fue desarrollar y evaluar empaques activos biodegradables basados en polisuccinimida (PSI) y almidón de maíz, reforzados con microcelulosa (nativa y acetilada) extraída de residuos de *Agave lechuguilla*, y funcionalizados con aceite esencial de orégano (AEO) para la conservación de carne molida de cerdo almacenada en refrigeración a 4 °C. Se formularon y estructuraron cuatro tratamientos (A, B, C y D) por extrusión y termoformado para evaluar las variables de modificación química (acetilación) y adición antimicrobiana. El análisis químico por espectroscopía infrarroja por transformadas de Fourier (FTIR) afirmó la síntesis exitosa de la PSI, la remoción de impurezas de la celulosa nativa y la incorporación homogénea de los agentes activos a la matriz mediante interacciones predominantemente hidrofóbicas. Los resultados de la evaluación física tras 10 días de almacenamiento mostraron que la acetilación disminuyó de manera drástica la hidrofilia natural del empaque, registrando el tratamiento B la menor humedad en la carne (51.23%). En los atributos cromáticos, la combinación de microcelulosa acetilada y AEO (tratamiento B) demostró la eficiencia óptima para preservar el color rojo de la carne ($a = 10.58$), indicador crítico de frescura comercial. Desde la perspectiva microbiológica, las matrices funcionalizadas con AEO ejercieron un efecto inhibitorio contundente, donde el tratamiento B exhibió los menores recuentos para coliformes totales (7.35 Log₁₀ UFC/g al día 7) y *Staphylococcus aureus* (7.41 Log₁₀ UFC/g al día 10), logrando reducciones de casi una unidad logarítmica frente al control sin aditivo. Se concluye que el empaque activo compuesto por PSI y microcelulosa acetilada con aceite de orégano constituye una alternativa viable y sustentable para prolongar la estabilidad visual y microbiológica de productos cárnicos.

1. INTRODUCCIÓN

La preservación de la carne fresca representa uno de los desafíos tecnológicos más críticos en la industria alimentaria actual, derivado de su elevada actividad de agua y abundancia de nutrientes, factores que facilitan la rápida proliferación microbiana y la degradación enzimática (Fang et al., 2017). Entre estas circunstancias, los cortes frescos de carne de cerdo postmortem conllevan una inestabilidad compleja de sus atributos organolépticos y estructurales, lo que exige estrategias de conservación adaptadas a su naturaleza. Tradicionalmente, la contención de estos productos se ha basado en sistemas de envasado pasivo de barrera inerte utilizando películas plásticas convencionales derivadas del petróleo, tales como el polietileno o el cloruro de polivinilo (Siracusa et al., 2008).

El camino hacia el desarrollo de biocompuestos es una buena respuesta para favorecer problemas de ambiente global avanzados, a partir de fuentes renovables y la valorización sustentable de coproductos agroindustriales (Rai et al., 2021).

A pesar de sus marcadas virtudes ecológicas, los biopolímeros nativos en su estado puro exhiben serias limitaciones operativas asociadas a una marcada hidrofilia, tendencia natural al hinchamiento físico y una deficiente tasa de permeabilidad al vapor de agua (Yang et al., 2020). Al entrar en contacto directo con el exudado constante o fluidos biológicos del tejido muscular porcino, estas películas sufren un fenómeno indeseado de plastificación excesiva por agua que debilita la red del envase, ocasionando una notable vulnerabilidad en sus resistencias mecánicas de tensión, rigidez y porcentaje de elongación (Alirezalu et al., 2021). Para subsanar esta fragilidad microestructural y optimizar la procesabilidad del material, la ingeniería moderna de envases recurre al diseño de biocompositos utilizando matrices sintéticas térmicamente biodegradables de alto rendimiento como la polisuccinimida (PSI). La PSI se sintetiza mediante la policondensación térmica en masa del ácido L-aspartico, constituyendo una fase continua mecánicamente robusta y un vehículo idóneo (*carrier*) para el confinamiento y dosificación de agentes funcionales (Hernández-Pérez et al., 2025).

La estabilización fisicoquímica e interfacial de estos sistemas compuestos

avanzados se logra mediante la incorporación de reforzantes naturales insolubles y modificaciones dirigidas, como la acetilación. La adición interfacial de microcelulosa insolubles extraída de fuentes semiáridas no convencionales, como los residuos de agave, genera una red que incrementa significativamente la elasticidad y la resistencia a los esfuerzos de tracción física (Hernández-Pérez et al., 2025). Asimismo, estas partículas modificadas reducen drásticamente la afinidad del material por el agua al crear un "camino tortuoso" denso que frena la difusión molecular de los vapores, disminuyendo la permeabilidad y evitando el colapso mecánico prematuro del empaque (Priyadarshi & Rhim, 2020)

Paralelamente, las funciones tradicionales de protección pasiva han evolucionado hacia el diseño de nuevos materiales denominadas empaques activos, diseñadas para interactuar deliberadamente con el alimento y su entorno interno (Yang et al., 2020). Esto se consigue mediante la funcionalización de la matriz polimérica con aditivos biológicamente funcionales de origen natural, entre los que destaca el aceite esencial de orégano (AEO) por su alto contenido de terpenos fenólicos como el carvacrol y el timol (Burt, 2004)(Hernández-Pérez et al., 2025). La matriz de polisuccinimida modificada actúa regulando eficientemente la tasa de difusión de estos compuestos activos, manteniendo una concentración inhibitoria mínima en la superficie de la carne durante periodos prolongados (Hernández-Pérez et al., 2025). Al liberarse gradualmente, estos activos hidrofóbicos interactúan con la bicapa lipídica de la microbiota contaminante y patógena típica del cerdo (como *Staphylococcus aureus*), alterando la permeabilidad de la membrana citoplasmática hasta provocar su inhibición metabólica (Fang et al., 2017). Adicionalmente, el control de este microambiente gaseoso y la acción antioxidante de los polifenoles bloquean el transporte de oxígeno molecular hacia la superficie del músculo, retrasando de forma eficiente la rancidez oxidativa de las grasas y previniendo la degradación del color rojo característico por formación de metmioglobina (Alirezalu et al., 2021).

Aunque existen diversos estudios sobre empaques biodegradables, la información relacionada con sistemas basados en polisuccinimida reforzada con

microcelulosa acetilada para la conservación de carne de cerdo continúa siendo limitada. Por ello, resulta necesario evaluar su comportamiento bajo condiciones reales de almacenamiento.

2. JUSTIFICACIÓN

La preservación de la carne fresca de cerdo representa uno de los desafíos más críticos para la industria de alimentos debido a su alta actividad de agua y riqueza nutricional, propiedades que aceleran la proliferación de microorganismos patógenos y el deterioro oxidativo. Tradicionalmente, la industria alimentaria ha resuelto esta problemática recurriendo a empaques convencionales derivados del petróleo, como el polietileno o el PVC. Sin embargo, el carácter estrictamente inerte de estas tecnologías limita su efectividad frente a la microbiota alterante superficial. A esto se suma el grave impacto ecológico derivado de su nula biodegradabilidad, la cual satura los entornos urbanos y acelera la crisis por contaminación de plásticos de origen fósil.

Ante este panorama, surge la necesidad apremiante de desarrollar sistemas de envasado activo a partir de fuentes renovables y biodegradables que interactúen dinámicamente con el alimento. El uso de biopolímeros nativos en su estado puro suele verse limitado a nivel operativo debido a su alta hidrofilia, provocando que el contacto directo con los exudados cárnicos colapse su rigidez y resistencia mecánica. Para mitigar estas limitantes físicas, esta investigación plantea el uso de matrices sintéticas térmicamente estables de alto rendimiento como la PSI, reforzadas con microcelulosa extraída de subproductos agroindustriales locales como el *Agave lechuguilla* bajo una visión de economía circular.

La innovación de este trabajo radica en la modificación estructural de dicho refuerzo mediante un proceso de acetilación, combinándolo simultáneamente con el potencial antimicrobiano y antioxidante del AEO. Esto permite pasar de una barrera inerte a una matriz hidrofóbica avanzada capaz de regular y ralentizar la tasa de difusión de compuestos activos volátiles (como el carvacrol y el timol) hacia la superficie del músculo porcino. Por lo tanto, este estudio se justifica plenamente al ofrecer una base científico-técnica competitiva frente a los plásticos convencionales, mitigando simultáneamente la acumulación de desechos persistentes y garantizando la inocuidad microbiológica y calidad visual de productos cárnicos refrigerados.

3. HIPÓTESIS

- **H0: Los empaques activos basados en de polisuccinimida, reforzados con microcelulosa y funcionalizados con aceite esencial de orégano ejercerán un impacto positivo en la preservación de los atributos de la carne de cerdo.**
- **Ha: Los empaques activos basados en de polisuccinimida, reforzados con microcelulosa y funcionalizados con aceite esencial de orégano no ejercerán un impacto significativo en la preservación de los atributos de la carne de cerdo.**

4. OBJETIVOS

4.1. General.

Desarrollar y evaluar empaques activos a base de polisuccinimida y microcelulosa a diferentes niveles de acetilación, para la conservación de carne de cerdo.

4.2. Específicos.

- Obtener materiales base para la elaboración de los empaques activos.
- Elaborar los empaques mediante procesos de formado y termoconformado.
- Caracterizar fisicoquímicamente los materiales y empaques desarrollados.
- Evaluar el efecto sobre las propiedades físicas de la carne almacenada en el empaque activo.
- Evaluar el efecto sobre la actividad microbiana sobre la carne almacenada en el empaque activo.

5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Empaque

El empaque dentro de la industria y ciencia de los alimentos se define como un sistema de contención técnico y protector diseñado específicamente para la contención, preservación, protección y transporte de un producto a lo largo de la cadena de distribución hasta su recepción por el consumidor final. De acuerdo con los principios de la ingeniería de embalajes, este elemento debe cumplir simultáneamente con tres funciones operacionales primarias: la contención del producto, la protección, y la habilitación de una fuente de comunicación e información legal, nutricional y comercial hacia el usuario (Lockhart, 1997), (Paine, 1991). En las ciencias agroalimentarias contemporáneas, este enfoque tradicional ha evolucionado hacia la búsqueda de sistemas avanzados capaces de mitigar activamente las reacciones de degradación interna y microbiológica de los productos perecederos (Yam2005, n.d.).

5.1.1 Empaques tradicionales

Los sistemas de empaque tradicionales representan los estándares comerciales consolidados para el suministro masivo de alimentos en la industria, fundamentando su disponibilidad en el empleo de materiales convencionales como plásticos derivados del petróleo, vidrio, metales y cartón según lo descrito por (Lockhart, 1997) y (Paine, 1991) en sus respectivos libros. Debido a su demanda tecnológica, estos contenedores ofrecen ventajas notables como una alta resistencia mecánica ante esfuerzos físicos de tensión o punción, una elevada disponibilidad en el mercado y un bajo costo económico de producción.

De igual manera la principal limitante de los empaques plásticos convencionales radica en su naturaleza funcional estrictamente pasiva. Al actuar como barreras inertes, estos contenedores carecen de mecanismos dinámicos para interactuar con el entorno interno del envase o para mitigar de manera activa los cambios microbiológicos y fisicoquímicos de los productos. A este factor tecnológico se le adjudica un impacto ecológico negativo, derivado de una baja o nula biodegradabilidad que promueve la acumulación persistente de residuos plásticos de origen fósil en el medio ambiente (Yam2005, n.d.).

5.1.2 Empaques biobasados

En la ciencia de los materiales biodegradables, los empaques biobasados se conceptualizan como una alternativa tecnológica orientada a reemplazar de forma progresiva a los polímeros sintéticos tradicionales derivados de recursos fósiles no renovables. Estos sistemas de envasado se fundamentan en el empleo de biopolímeros obtenidos directamente de fuentes de origen biológico de origen vegetal o microbiano como los subproductos de desechos agrícolas o a través de rutas metabólicas de síntesis bacteriana (Espinoza-Acosta, 2021).

De acuerdo con la literatura, los envases de polímeros biobasados superan a los tradicionales debido a su composición macromolecular, ya que permite la incorporación homogénea de compuestos biológicamente funcionales (Fang et al., 2017). En esta interacción el biomaterial transforma un material inerte a un envase con características fisicoquímicas que interactúa con el contenido, extendiendo la vida útil en anaquel de productos perecederos (Fang et al., 2017)

Los biopolímeros puros de origen natural (proteínas y polisacáridos) representan la base en el desarrollo de empaques sustentables sin embargo este tipo de material presenta unas menores capacidades mecánicas, lo que las hace susceptibles a un mayor deterioro (Rai et al., 2021).

Al entrar en contacto con entornos acuosos, se desencadena un proceso de hidratación, las moléculas de agua penetran y se difunden en las zonas de la película, provocando el hinchamiento y la formación de una capa gelificada superficial, posteriormente, las cadenas de polímeros se mezclan en agua terminan por dispersarse en el medio (Yang et al., 2020). Esta elevada afinidad por el agua se conoce como hidrofilia, la cual constituye el inconveniente más común y un problema que retarda la adopción masiva de estos biomateriales a escala industrial (Priyadarshi & Rhim, 2020). En el contexto de las ciencias agroalimentarias, esta sensibilidad al agua compromete de forma drástica la viabilidad del envasado cuando se aplica a matrices alimentarias frescas con una elevada actividad de agua, tales como los productos cárnicos frescos (Espinoza-Acosta, 2021).

5.2 Biomateriales usos e importancia

El término biomateriales o biopolímeros se refiere específicamente a macromoléculas que han sido aprobadas para su uso comercial debido a su origen biológico, su biodegradabilidad o ambas cualidades en un solo sistema (Rai et al., 2021). El uso y la importancia de estos compuestos dentro del sector de productos cárnicos ha adquirido una amplia relevancia debido a la necesidad urgente de disminuir los severos problemas ecológicos derivados de la acumulación de plásticos sintéticos tradicionales. Al interactuar activamente con el sector alimentario, los biomateriales no solo cumplen la función clásica de contener el producto, sino que también actúan modificando de forma controlada el entorno al interior y la actividad fisicoquímica del empaque para preservar la inocuidad y la calidad organoléptica de los alimentos perecederos. (Siracusa et al., 2008)

5.2.1 Ventajas de su uso

La utilización de biomateriales y polímeros biodegradables en la industria del embalaje alimentario ofrece importantes beneficios de sustentabilidad ecológica y conservación de recursos. La principal ventaja de estos compuestos frente a los plásticos petroquímicos tradicionales radica en su capacidad de sufrir una degradación biológica limpia a través de la acción enzimática de microorganismos (Rai et al., 2021).

Al ser introducidos en entornos de desecho o compostaje, los biopolímeros se mineralizan de forma segura, transformándose exclusivamente en dióxido de carbono, metano, agua e ingredientes orgánicos que se asimilan directamente en el suelo sin liberar sustancias o residuos de naturaleza tóxicos (Siracusa et al., 2008).

De igual manera, estos materiales permiten reducir la huella de carbono industrial al disminuir el volumen de desperdicios sólidos persistentes que se acumulan anualmente en los basureros urbanos. (Siracusa et al., 2008)

5.2.2 Desventajas de su uso

A pesar de las marcadas ventajas y virtudes sustentables, los biomateriales presentan severas desventajas físicas, mecánicas y operativas, lo que limita su adición competitiva a nivel industrial. El mayor inconveniente tecnológico es su alta hidrofilia y la tendencia natural para absorber agua, lo que los hace propensos a hinchamiento y baja resistencia a la

humedad, así como la migración de color a los productos almacenados (Yang et al., 2020). Debido a la falta de estas propiedades los biomateriales carecen de propiedades de barrera eficientes al vapor de agua, y al entrar en contacto directo con alimentos con alta actividad de agua, tales como la carne fresca, sufren pérdidas drásticas de estabilidad física y capacidad de protección (Alirezalu et al., 2021).

Así mismo los materiales en su estado puro o nativo suelen manifestar perfiles de resistencia notablemente deficientes en comparación con los materiales de origen petroquímico. Compositos de gran interés como el quitosano puro carecen de propiedades termoplásticas convencionales y experimentan una degradación térmica irreversible antes de alcanzar un punto de fusión fluido medible (Rai et al., 2021) (Priyadarshi & Rhim, 2020).

Por otra parte, el financiamiento de este tipo de biomateriales representa una fuerte limitante, ya que la producción industrial y los procesos de purificación química conllevan costos elevados, provocando que actualmente no se encuentren disponibles en el mercado a precios competitivos. Además, la obtención de algunos bioplásticos genera un conflicto de intereses debido al uso de terrenos agrícolas que entran en competencia directa con el área de producción de alimentos humanos (Rai et al., 2021).

Finalmente, en el campo de envasado activo, la incorporación de altas concentraciones de aceites esenciales puede incurrir en la modificación organoléptica indeseables del alimento, tales como la transmisión de olores y sabores extraños que alteran la calidad sensorial del producto (Hyltdgaard et al., 2012). Desde el lado microbiológico, existe también un riesgo de seguridad alimentaria, ya que al aplicar agentes antimicrobianos se elimina al microbiota alternante banal lo que favorece la proliferación selectiva y el desarrollo de toxinas de patógenos anaerobios peligrosos si las condiciones atmosféricas son deficientes. (Ahmed et al., 2017).

5.3 Tipos de biomateriales

5.3.1 Polisuccinimida

La polisuccinimida (PSI) es un polímero sintético biodegradable que de liberación prolongada que posee un elevado interés tecnológico, debido a su termo estabilidad y versatilidad para el diseño de empaques activos destinados a la conservación de productos alimenticios. Este biomaterial se obtiene de manera directa mediante la policondensación

térmica del ácido aspártico (ácido L-aspártico) a temperaturas controladas de 250 a 300 °C(Hernández-Pérez et al., 2025).

Su estructura molecular, basada en anillos de succinimida, le confiere una rigidez estructural elevada, lo cual limita su procesabilidad directa, pero permite su uso como precursor de hidrogeles y biopelículas funcionalizadas (Priyadarshi & Rhim, 2020).

La versatilidad de la PSI radica en su capacidad para actuar como una matriz de liberación sostenida de compuestos activos, manteniendo su integridad estructural durante el procesamiento industrial (Hernández-Pérez et al., 2025)(Ahmed et al., 2017).

5.3.2 Almidón

El almidón (ST) es uno de los polisacáridos más utilizados en la elaboración de biomateriales, debido a su gran abundancia, bajo costo y capacidad de formar películas con propiedades de barrera selectivas a los gases (Yang et al., 2020)(Siracusa et al., 2008). Sin embargo, su naturaleza altamente higroscópica, derivada de la abundancia de grupos hidroxilos libres, compromete su desempeño físico en entornos con alta actividad acuosa, siendo necesario aplicar modificaciones como la acetilación para reducir dicha afinidad por el agua (Hernández-Pérez et al., 2025). En la industria cárnica, el ST no solo sirve como material estructural, sino que funciona como un agente ligante que mejora el rendimiento de cocción y modifica positivamente el perfil de textura al estabilizar la inmovilización del agua en el producto(Acosta-Pérez et al., 2019)(Akwetey & Knipe, 2012). Estudios demuestran que el ST de maíz acetilado con grados de sustitución entre 0.44 y 1.25 reduce significativamente la solubilidad en agua y el contenido de humedad en biocompuestos(Hernández-Pérez et al., 2025).

5.3.3 Celulosa

La celulosa se reconoce como una parte fundamental para la elaboración de biomateriales, por su importancia mecánica dentro del empaque, principalmente la microcelulosa (MCS) debido a su estructura cristalina con enlace D-glucopiranososa y β -(1-4) la MCS aporta una resistencia que contrarresta con la fragilidad de las matrices (Gañán et al., n.d.) (Espinoza-Acosta, 2021). Para elevar su compatibilidad con matrices hidrofóbicas, la celulosa puede ser modificada mediante acetilación, proceso que reduce drásticamente su permeabilidad

al vapor de agua hasta en un 56.4% al crear una barrera más tortuosa para la difusión molecular(Hernández-Pérez et al., 2025). Esta optimización fisicoquímica no solo mejora las propiedades mecánicas, sino que también aumenta la estabilidad térmica del compuesto final lo que se evidencia por incrementos en la temperatura de fusión observados mediante estudios de calorimetría.(Hernández-Pérez et al., 2025)

5.4 Biocompositos

5.4.1 Estructura y funcionamiento

Los biocompositos representan una estrategia avanzada en la ciencia de los materiales, donde se busca la combinación de una matriz polimérica biodegradable con materiales de refuerzo para mejorar las deficiencias mecánicas a las que este tipo de material está expuesto (Rai et al., 2021). El propósito de estos sistemas se basa en la transferencia de esfuerzos mecánicos desde la matriz hasta la fase reforzante, la cual por lo general está compuesta por fibras las cuales realizan el trabajo de soporte en toda la estructura acompañada por nanopartículas complementarias (Espinoza-Acosta, 2021). Al integrar estos refuerzos de origen vegetal, como las fibras lignocelulósicas derivadas de subproductos del agave, se crea una red tridimensional que obstaculiza la difusión de moléculas gaseosas y de vapor de agua a través del material (Espinoza-Acosta, 2021)(Priyadarshi & Rhim, 2020). A este mecanismo según la bibliografía se conoce como “camino tortuoso” y reduce significativamente la permeabilidad del empaque frente a humedad intrínseca (Andrade et al., 2021)

5.4.2 Matriz polimérica biobasada

desempeñando la función de proporcionar atracción física, transferir los esfuerzos mecánicos y regular la liberación controlada de agentes funcionales hacia el alimento envasado (Siracusa et al., 2008). Dentro de las matrices innovadoras se encuentra la PSI, un polímero biodegradable que demuestra una capacidad única de liberación prolongada y sostenida de compuestos volátiles activos (Hernández-Pérez et al., 2025). Sin embargo, al presentar capacidad hidrofílica presentan deficiencias de resistencia mecánica y pobre resistencia a la humedad por lo que requieren la incorporación de plastificantes como el glicerol para aumentar la flexibilidad y movilidad macromolecular de la película final (Priyadarshi & Rhim, 2020).

5.4.4 Reforzantes naturales

La incorporación de reforzantes naturales, particularmente fibras obtenidas de desechos agroindustriales, permite modificar la estructura interfacial del biocomposito para obtener un material con mayor resistencia. Las microfibras y nano fibras de celulosa, como las extraídas de residuos de *Agave lechuguilla*, funcionan como refuerzo que mejoran las propiedades mecánicas sin comprometer la biodegradabilidad del empaque (Espinoza-Acosta, 2021). Un aspecto importante es la modificación química de estos refuerzos, por ejemplo, la acetilación aumenta la hidrofobicidad del material, reduciendo la permeabilidad al vapor de agua y mejorando la compatibilidad entre el refuerzo y la matriz polimérica, lo que resulta en una estructura interna más homogénea y compacta (Hernández-Pérez et al., 2025). Este mejoramiento físico es vital para proteger productos cárnicos, donde la integridad del envase debe mantenerse a pesar del contacto prolongado con exudados (Alirezalu et al., 2021).

5.4.4. Aditivos funcionales (en empaques activos)

En el diseño de empaques activos se integran aditivos funcionales en la matriz de este mismo para la liberación prolongada de compuestos que estén en contacto con el alimento y así mejorar la calidad del producto (Ahmed et al., 2017). Los aceites esenciales como el aceite esencial de orégano (AEO), han tomado gran relevancia por su acción antimicrobiana y antioxidante debido a la alta presencia de carvacrol y timol, los cuales son agentes fenólicos (Brochot et al., 2017)(Burt, 2004). Estos compuestos se agregan a la matriz para que ejerzan una liberación controlada y funjan como agentes bacteriostáticos al inhibir el crecimiento de microorganismos alterantes y retrasa la oxidación lipídica de la carne (Domínguez et al., 2018). Estudios recientes demuestran que la combinación de PSI, compuestos acetilados y AEO logran una liberación sostenida que protege de manera más eficiente cortes de carne porcina durante periodos prolongados de almacenamiento refrigerado(Hernández-Pérez et al., 2025)

5.5 Tendencias

5.5.1 Tendencias en envasado.

La industria se encuentra en un proceso de migración hacia las nuevas tendencias en envasado, como lo son el empackado activo ya que son sistemas de empaque diseñadas para interactuar con el alimento. Esta nueva evolución está impulsada por el consumidor y su deseo de alimentos más frescos mínimamente procesados y con una mayor vida en anaquel, sin uso excesivo de conservadores químicos. Una de las tendencias es la adición de nanomateriales dentro de la matriz polimérica biodegradable las cuales mejoran considerablemente la barrera contra contaminantes, gases y vapor de agua, además de actuar como vehículos para la liberación de aditivos dentro del empaque (Fang et al., 2017). La sostenibilidad se ha consolidado como principal tema de innovación. El desarrollo de empaques a partir de subproductos agroindustriales, como el bagazo de agave, no solo disminuye la huella de carbono al reducir la disposición de residuos, sino que proporciona estructuras con capacidades mecánicas y térmicas competitivas frente a los plásticos derivados del petróleo (Espinoza-Acosta, 2021). Este enfoque de economía circular es hoy el estándar para el diseño de nuevos materiales, permitiendo que las películas posean una funcionalidad intrínseca que contribuye directamente a la inocuidad alimentaria (Rai et al., 2021).

Finalmente, el monitoreo en tiempo real representa una frontera técnica en expansión. Los sistemas actuales ya no se limitan a la contención; se diseñan para responder a cambios en el pH, la temperatura o la presencia de metabolitos de descomposición, transformando el envase en una interfaz inteligente que garantiza la calidad del producto cárnico hasta el momento de su consumo (Priyadarshi & Rhim, 2020).

5.6 Empacado activo

El empackado activo se define como un sistema donde el envase, el alimento y el entorno interno interactúan de manera deliberada para preservar la calidad del producto. A diferencia del envasado convencional, que busca una barrera inerte, el empackado activo incorpora componentes funcionales que modifican activamente las condiciones del espacio de cabeza o del propio alimento para extender su vida útil (Fang et al., 2017).

5.6.1 Control de humedad

El control de humedad es un parámetro indispensable para el envasado de productos cárnicos dado que la aw en estos productos es elevado, lo que promueve al crecimiento bacteriano y la degradación enzimática. Muchos de los materiales biobasados son de alta hidrofiliidad, lo que se traduce en una limitada resistencia a la humedad (Espinoza-Acosta, 2021). el control de esta variable es fundamental para la conservación de la estructura en el envase y evitar el ablandamiento prolongado. La acetilación es una forma de contrarrestar esta deficiencia en el material, llevando así a la MCC a un estado hidrofóbico asegurando la barrera de vapor en el envase. (Hernández-Pérez et al., 2025).

5.6.2 Remoción de oxígeno

La remoción de oxígeno es una estrategia esencial para mitigar las reacciones de oxidación lipídica y prevenir el crecimiento de microorganismos aerobios en la carne de cerdo. La presencia de O² dentro del empaque actúa como un catalizador para la degradación de los pigmentos como mioglobina y la generación de olores indeseables. La tecnología de remoción de gases tiene como objetivo reducir la presión parcial de O² a niveles mínimos, creando un ambiente que favorece la estabilidad sensorial y la seguridad microbiológica del producto (Priyadarshi & Rhim, 2020)

5.6.3 Control microbiano

Según (Brochot et al., 2017) La actividad biocida es atribuida principalmente al mono terpenos fenólicos, específicamente el carvacrol y el timol. Estos compuestos poseen una naturaleza lipofílica que les permite interactuar con la bicapa lipídica de las bacterias, alterando la fluidez de la membrana y provocando la desnaturalización de proteínas de membrana críticas para el transporte iónico. El mecanismo de acción más utilizado es la adición de aceites esenciales como el AEO al involucrar la desestabilización de la membrana citoplasmática de los microorganismos lo que conduce en la inhibición metabólica (Fang et al., 2017)

5.6.4 Atrapadores de oxígeno

Los atrapadores de oxígeno son componentes que integran el sistema de empaque, diseñados principalmente para retener selectivamente gases presentes en espacios dentro del modelo base. Este tipo de sistema utiliza procesos químicos o enzimáticos que reducen rápidamente la concentración de O² residual tras su sellado. Este tipo de tecnología es eficaz para la conservación de cárnicos ya que inhibe el crecimiento bacteriano y retarda la oxidación lipídica (Priyadarshi & Rhim, 2020).

5.6.5 Emisores

A diferencia de los atrapadores, los emisores son sistemas destinados a liberar sustancias activas de forma controlada hacia el alimento o su entorno. En el caso de los empaques bioactivos, esta función es crítica para la incorporación de compuestos como los monoterpenos fenólicos provenientes de aceites esenciales. La matriz polimérica como la PSC reforzada con fibra de agave actúa como un reservorio que regula la tasa de difusión de estos agentes, garantizando una protección prolongada frente a agentes patógenos sin saturar los atributos organolépticos del producto (Hernández-Pérez et al., 2025).

5.6.6 Antimicrobianos

Estos empaques liberan agentes antimicrobianos que interrumpen las funciones vitales de microorganismos como *Staphylococcus aureus* o diversas bacterias de la microbiota contaminante en la carne de cerdo. La eficiencia de estos sistemas depende estrechamente de la liberación continua de agentes como AEO, la cual debe estar sincronizada con la fase logarítmica de crecimiento bacteriano para potenciar su eficacia (Fang et al., 2017).

5.7 Conservación de productos cárnicos

5.7.1 Técnicas de conservación

El envasado en atmósfera protectora se define como una técnica que implica la sustitución, parcial o total del aire atmosférico por una mezcla controlada, diseñada para reducir la velocidad de las reacciones de degradación y prolongar la vida útil del alimento (García Iglesias et al., 2006).

Las diferentes técnicas de envasado son:

- Envasado al vacío: es una técnica basada en la eliminación del aire en el envase reduciendo parcialmente la presión de O^2 para limitar el metabolismo de microorganismos aerobios patógenos (García Iglesias et al., 2006).
- Envasado en atmósfera modificada: Consiste en la inyección de una mezcla gaseosa equilibrada (predominantemente dióxido de carbono, nitrógeno y trazas de oxígeno). El dióxido de carbono desempeña un rol crucial al disolverse en la fase acuosa del alimento, acidificando el pH intracelular de los microorganismos y extendiendo eficazmente la fase de latencia del crecimiento microbiano (García Iglesias et al., 2006).

5.7.2 Carne de cerdo

5.7.2.1 Principales afecciones

El deterioro principal de la carne de cerdo es la pérdida de sus atributos sensoriales, debido a la oxidación y pérdida de pigmentos por exudado lo que causa las apariencias indeseables en las coordenadas de CIE LaB, así mismo la inestabilidad de lípidos en la carne porcina aumenta el riesgo de oxidación generando sabores y olores a rancio disminuyendo su aceptabilidad comercial (El-Din Ahmed Bekhit et al., 2018).

5.7.2.2 Flora contaminante

La carne porcina es la matriz para el crecimiento de microorganismos psicrotrofos, coliformes totales y bacterias ácido-lácticas aumentando el riesgo biológico crítico (Acuña Idrogo, 2019).

De acuerdo con investigaciones recientes sobre el uso de agentes antimicrobianos naturales, se ha documentado que la incorporación de aceites esenciales en especial AEO en películas activas logra una reducción drástica en los recuentos bacterianos, superando la eficacia de los métodos de envasado convencionales al desestabilizar la membrana citoplasmática del patógeno (Hernández-Pérez et al., 2025). Este tipo de capacidad biocida proveniente de este tipo de aceites esenciales por la interacción de terpenos fenólicos en la capa lipídica bacteriana resulta en el control de ecosistemas microbianos patógenos (Alirezalu et al., 2021).

5.7.2.3 Tasa de crecimiento rápida

El avance genético hacia factores de crecimiento rápido en la industria porcina moderna ha sido vinculado con una mayor susceptibilidad al estrés oxidativo celular y la aparición de miopatías que alteran la capacidad de retención de agua y el perfil de textura de la carne (Acuña Idrogo, 2019). Este fenómeno, que acelera la degradación del tejido muscular, exige que las condiciones de almacenamiento y envasado sean precisas, manteniendo siempre la cadena de frío en rangos de 0 a 4 °C.

La estabilidad del producto cárnico durante la cadena logística está intrínsecamente ligada al control ininterrumpido de la cadena de frío, con rangos de temperatura críticos entre 0 y 4 °C para el almacenamiento refrigerado. Según los estudios, cualquier fluctuación térmica fuera de este intervalo acelera la degradación metabólica y favorece la proliferación de microbiota oportunista, lo que subraya la importancia de integrar tecnologías de envasado que actúen como una barrera adicional ante las condiciones ambientales variables durante el transporte (Hernández-Pérez et al., 2025).

En este contexto, la implementación de empaques activos basados en PSI reforzada con celulosa de agave y aceites esenciales no solo cumple una función física de contención, sino que optimiza el control de la humedad superficial y permite la liberación controlada de compuestos fenólicos, garantizando una mayor estabilidad microbiológica y sensorial frente a los desafíos logísticos. Este enfoque avanzado de envasado activo supera las limitaciones de las películas de polietileno o cloruro de polivinilo convencionales, las cuales carecen de propiedades funcionales frente a patógenos aeróbicos y no ofrecen protección ante la pérdida de luminosidad del tejido muscular durante periodos prolongados de distribución (Aziman et al., 2021)

6. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó dentro del laboratorio de inocuidad y empaques localizado en el departamento de ciencia y tecnología de alimentos, ubicado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Saltillo, Coahuila; en conjunto con la facultad de zootecnia de la Universidad Autónoma de Chihuahua, ubicada en la ciudad de Chihuahua, Chihuahua.

6.1 Etapa 1.- Obtención de materiales base

6.1.1 Almidón

Se utilizó almidón de maíz comercial de grado alimenticio con el objetivo de asegurar la pureza y composición constante, garantizando la reproducibilidad de los resultados durante los procesos de caracterización y procesamiento de los materiales.

6.1.2 Polisuccinimida

El proceso de obtención de PSI inició con el calentamiento continuo controlado en un vaso de precipitado, durante el procedimiento el material estuvo en constante movimiento para garantizar la distribución uniforme de calor. El proceso se mantuvo en un rango de temperatura entre 200-300 °C hasta que el material obtuvo una tonalidad rosado claro, con lo cual describe el protocolo de policondensación térmica del ácido L-aspártico según lo establecido por (Hernández-Pérez et al., 2025). Posteriormente se realizaron procesos continuos de filtrado, lavado y neutralización para la obtención de PSI.



Figura 1. Policondensación térmica PSI (elaboración propia)

6.1.3 Microcelulosa

Según (Gañán et al., n.d.) la obtención de microcelulosa a partir de *agave lechuguilla* se llevara a cabo mediante un proceso de hidrolisis acida controlada la primera parte del proceso es el tratamiento con ácido sulfúrico al 98% teniendo una relación de 20 ml por cada gramo de fibra durante 2 horas, en el intermedio del proceso se lleva a cabo un blanqueamiento con cloración, después, se repite el proceso con la sustitución de ácido sulfúrico por hidróxido de sodio por 2 horas, finalizando controlando el pH de la MCS con agua destilada. Por último, la fibra es depositada en una estufa a 60°C por 24h.

para finalizar la obtención de MCS se lleva a cabo un proceso de molienda en la cual se obtiene microcelulosa nativa (MCN) la cual se tamizo con una malla numero 150 con abertura de 140 micrómetros.

6.1.4 Microcelulosa acetilada

Al obtener la MCN se procede al proceso de acetilación incorporando ácido acético, utilizando como catalizador ácido tartárico. Para la continuidad del experimento se utiliza MCS como materia prima de la cual se se utilizan 5g adhiriendo 50 ml de ácido acético utilizando el catalizador en una cantidad de 0.47g esto por cada proceso de acetilación. El tiempo establecido de reacción es es de 3 horas. Estas condiciones experimentales se mantuvieron constantes en todas las acetilaciones realizadas.

El proceso se elaboró en un matraz bola de 250ml donde se mezclaron la MCS, ácido acético y ácido tartárico. Para la correcta reacción se utilizó un sistema de condensador de flujo, a una temperatura de 120°C y agitación magnética constantes por el tiempo establecido de 3 horas. Al usar un condensador de flujo ayuda a recuperar el ácido acético volátil pudiendo así recircular el material. cumpliéndose el tiempo la MCS se filtra con embudo, papel filtro y un matraz Erlenmeyer para la recolección del residuo, se realizan una serie de lavados con agua destilada para obtener un pH neutro.

Finalmente, al obtener la microcelulosa acetilada (MCA) en el pH estandarizado se somete a un proceso de secado, en el cual la temperatura debe estar a 50°C por un tiempo de 24 horas.



Figura 2. Lavado y filtrado de MCA (elaboración propia)

6.2 Etapa 2.- Elaboración de empaques

6.2.1 Extrusión

Para la elaboración de las tiras plásticas se prepararon 4 variables de material A, B, C Y D cada tratamiento con diferente mezcla utilizando el mismo material ST, MCS, MCA, AEO, PSI Y glicerol. Cada uno de los tratamientos mantuvieron una proporción constante 22.22% de ST, 22.22% de PSI, 30.22 de glicerol, las únicas variables se observaron en la MSC, MCA y AEO. Los tratamientos con las variables se emplearon como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Variables de tratamientos

Tratamiento	PSI (%)	ST (%)	MCS (%)	MCA (%)	AEO (%)	GLICEROL (%)	SUMATORIA	Cajas resultantes
A	22.22	22.22	22.22	0	3.1	30.22	99.98	12
B	22.22	22.22	0	22.22	3.1	30.22	99.98	12
C	22.22	22.22	22.22	0	0	30.22	99.98	6
D	22.22	22.22	0	22.22	0	30.22	99.98	6

- Tratamiento A: se formuló con 22.22% de PSI, 22.22% de ST 22.22% de MCS, 3.1% de AEO y 30.22% de glicerol. La variable de este tratamiento fue cambiar MCA por MCS con AEO.
- Tratamiento B: Se formuló con 22.22% de PSI, 22.22% de ST 22.22% de MCA, 3.1% de AEO y 30.22% de glicerol. La variable de este tratamiento fue cambiar MCS por

MCA con AEO, siendo este el tratamiento estándar propuesto en investigaciones anteriores.

- Tratamiento C: Se formuló con 22.22% de PSI, 22.22% de ST 22.22% de MCS y 30.22% de glicerol. La variable de este tratamiento fue cambiar MCA por MCS y omitir el uso de AEO.
- Tratamiento D: se formuló con 22.22% de PSI, 22.22% de ST 22.22% de MCA, 3.1% de AEO y 30.22% de glicerol. La variable de este tratamiento fue cambiar MCS por MCA omitiendo el uso de AEO.

Cada sumatoria de tratamiento equivalió a 99,98% lo que nos da un alto porcentaje en la pureza de los materiales, para el tratamiento A y B se obtuvieron 12 cajas; para el C y D 6 cajas.

Estas variables permitieron comparar el uso de MCS y MCA añadiendo o retirando AEO y poder así comparar las propiedades antimicrobianas del AEO.



Figura 3. Empaque tratamiento B (elaboración propia)

6.2.2 Termoformado

El termoformado del material es una etapa clave para la unión de la mezcla extruida para hacer una pieza de mayor tamaño, utilizando calor y presión en favor de la unificación del material observando el flujo de un material rígido a un material más elástico para facilitar el moldeado del material. Con este paso se puede evaluar la capacidad de estabilidad y conformación de estos compuestos poliméricos a partir de *agave lechuguilla*.

Para la elaboración de los empaques de tratamientos A, B, C y D se utilizó una tortilladora modificada como prensa térmica, la cual opera a una temperatura máxima superficial de 250°C. el material después de extrusión se colocó en la tortilladora por 5 minutos el cual se estableció como tiempo predeterminado en el cual se completó la unión correcta de la matriz polimérica. La transferencia de calor permitió el ablandamiento del material por la disposición de movilidad molecular que el calor le otorgo a la matriz, así como la reorganización parcial de cadenas de polisacáridos.

Una vez cumplido el tiempo de termoformado la placa de material se cambió a una tortilladora de metal a temperatura ambiente permitiendo un choque rápido de calor para que la estructura se conforme y evitar algún tipo de agrietamiento en sus paredes, ayudando también al enfriamiento para una mejor manipulación del material. Mediante este análisis se determinó el comportamiento térmico y la funcionalidad de las formulaciones por prensado, validando su potencial para la fabricación de biocompuestos y empaques biodegradables.

6.3 Etapa 3.- Caracterización de los materiales obtenidos

6.3.1 Caracterización química

La espectroscopía infrarroja por transformadas de Fourier (FTIR) se utilizó para la identificación de los grupos funcionales de los biopolímeros utilizados del *agave lechuguilla* y ST, analizar también la itinerancia entre las mezclas de los tratamientos A, B, C y D. esta técnica es crucial para caracterizar materiales poliméricos, ya que permite detectar modificaciones estructurales obtenidas a partir de la acetilación de la microcelulosa, la incorporación de PSI, ST, AEO, glicerol y el proceso de termo formado en el material final. Las gráficas obtenidas, permitieron comparar los tratamientos y evidenciar los cambios químicos en la itinerancia de los materiales utilizados. Estos resultados permitieron observar la compatibilidad de los componentes, la eficiencia de la acetilación y la huella de los procesos térmicos (extrusión y termoformado).

Etapas 4.- Evaluación de la actividad antimicrobiana

6.3.2 Acondicionamiento de la carne de cerdo

Se depositaron aproximadamente 15 g de carne molida de cerdo en los envases y posteriormente se introdujeron en bolsas Ziploc® y fueron almacenadas en refrigeración a $4 \pm 1^\circ\text{C}$ (HR≈50%) por 10 días. Se realizaron muestreos a los 0, 4, 7 y 10 días para realizar los análisis que se mencionan a continuación.

6.3.2.1 Propiedades Físicas

6.3.2.1.1 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).



Figura 4. Dsecación de carne molida de cerdo (elaboración propia)

6.3.2.2 Análisis microbiológico

Se pesó 1 g de carne de cada tratamiento y se homogenizó con 9 mL de diluyente de máxima recuperación (MRD, CM0733, Oxoid, Basingstoke, Hampshire, Inglaterra) para

obtener la dilución 1:10, posteriormente se realizaron diluciones seriadas hasta 10^7 . Posteriormente, se sembraron 10 μ L en los medios por el método de siembra por estría. Para coliformes totales se utilizó agar Bilis y Rojo Violeta (agar Bilis y Rojo Violeta, MCD LAB, San Jacinto Amilpas, Oaxaca, México), para mesófilos aerobios totales en agar métodos estándar (agar para Métodos estándar, MCD LAB, San Juanito Amilpas, Oaxaca, México) y finalmente para *Staphylococcus aureus* agar Baird Parker (base de agar Baird Parker, BDBioxon, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México) a 35 °C por 24 h para coliformes totales y mesófilos aerobios y por 48 h para *Staphylococcus aureus*.

6.3.2.3 Actividad antimicrobiana contra flora mesofila ambiental

En este punto se optó por la realización de antibiogramas con la incubación en cajas con agar correspondiente para el aislamiento de cada microorganismo. La carne molida previamente resguardada en refrigeración de 0-4°C, los antibiogramas se realizaron con una pieza de placa de ± 0.5 cm de diámetro con un grosor máximo a 2mm esto, con tratamiento A, B, C Y D en cajas sembradas con la dilución 5 en escala de McFarland, para realizar la medición del halo de inhibición en cada microorganismo.

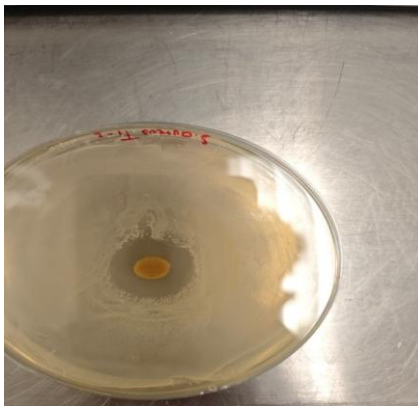


Figura 5. Halo de inhibición en *s. aureus* tratamiento A

6.3.2.4 Análisis estadístico

Se realizó una 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 GLM del SAS 9.4, (SAS institute, Inc., 2023) y una comparación de medias por Tukey 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: Caracterización de los materiales

7.4.4. CARACTERIZACION QUIMICA FTIR

La Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) se empleó con el objetivo de identificar los grupos funcionales presentes en los biopolímeros aislados y comerciales, así como para evaluar las interacciones moleculares y el éxito de las modificaciones estructurales en los compósitos desarrollados.

Para cada tratamiento (A, B, C y D) el análisis por FTIR se llevó a cabo por triplicado (R1, R2 y R3), al igual que con la PSI, MSC y el aceite esencial de orégano.

7.1.1.1. Polisuccinimida

Al analizar la PSI mediante FTIR, se obtuvieron las bandas características que confirman su síntesis por policondensación térmica a partir del ácido aspártico. El espectro reveló una banda de absorción correspondiente a la vibración del enlace N-H. Asimismo, las señales más prominentes, las cuales se asignan al estiramiento del grupo carbonilo característico del anillo imida. Finalmente, se identificaron bandas en la región de asociadas a los enlaces C-N, lo que corrobora la correcta estructuración y pureza del polímero base funcional que actuará en el sistema de empaque.

Comentado [FH1]: Los resultados deberían reportarse de acuerdo con cada etapa de la metodología. Si se deja como está, da la impresión de que se siguió una metodología diferente a la descrita. SUGIERO REORGANIZAR ESTE CONTENIDO.

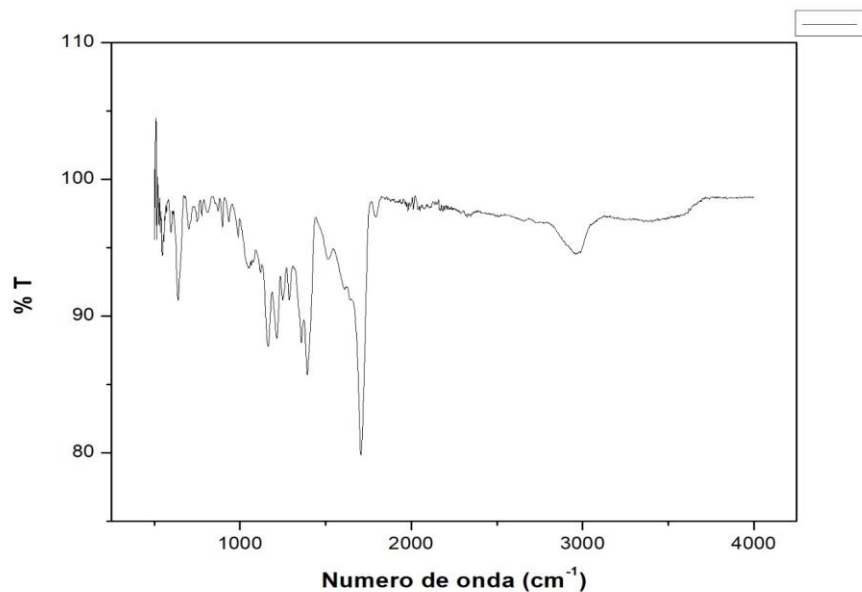


Figura 6 FTIR polisuccinimida representación de R1, R2 y R3 (elaboración propia)

7.1.1.2. Microcelulosa

El espectro FTIR de la (MCN), obtenida a partir de los residuos lignocelulósicos de las fibras de *agave de lechuguilla*, mostró el perfil clásico de los polímeros basados en carbohidratos. Se observó una banda ancha intensa en la región de 3300–3400 cm^{-1} , correspondiente a la vibración de estiramiento de los grupos hidroxilo libres e intermoleculares propios de la celulosa. Se identificó el pico de estiramiento del enlace C-H de los grupos metilo y metileno. La fuerte absorción en la región entre 1200 y 900 cm^{-1} refleja las bandas intensas de estiramiento C-O y C-C del anillo glucosídico, lo que confirma la eliminación eficiente de la lignina y hemicelulosa durante los procesos de cloración y lavado neutro realizados en el laboratorio.

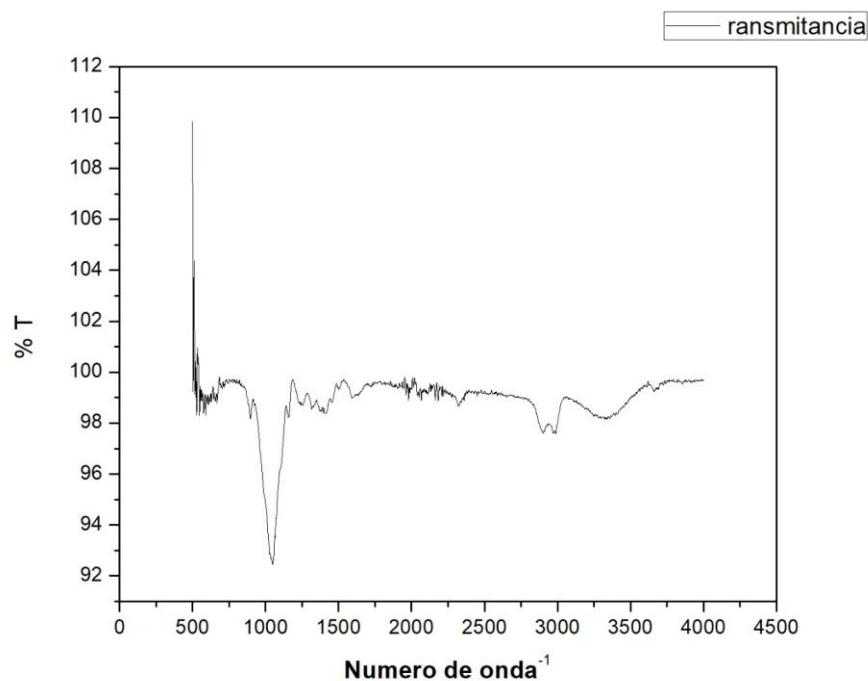


Figura 7 FTIR de microcelulosa representación de R1, R2 y R3 (elaboración propia)

7.1.1.3. Aceite esencial de orégano

El análisis de AEO, evidenció un patrón complejo de absorción que confirma la presencia de sus principales compuestos bioactivos y antioxidante. Se identificó una banda ancha en el rango de $3400\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ asignada a la vibración de estiramiento del grupo O-H de carácter fenólico. Las señales en $2900\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ corresponden a las vibraciones C-H de los grupos metilo y metileno. La presencia de los dobles enlaces conjugados del anillo aromático de los terpenoides se manifestó a través de la banda de estiramiento del doble enlace carbono carbono en el rango de $1600\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$. Por último, la región entre 1200 y 1500 cm^{-1} mostró las deformaciones C-H y estiramientos C-O típicos de los fenoles volátiles que conferirán la actividad activa al bioempaquetado.

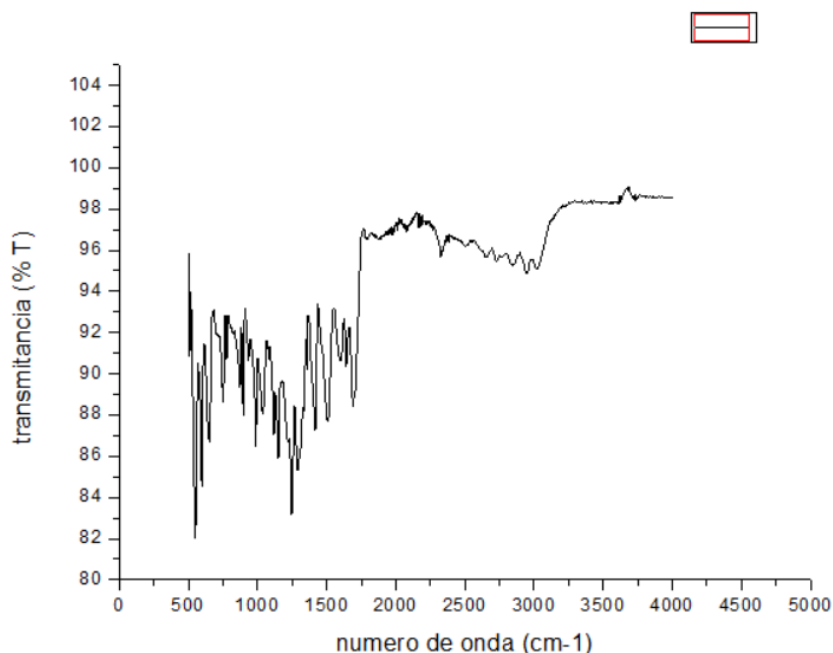


Figura 8_FTIR Aceite Esencial de Orégano (elaboración propia)

7.1.1.4. Compositos

7.1.1.4.1. Ta: MCS sin acetilar con AEO

En el espectro se pudo observar la interacción entre los compósitos para la elaboración de la matriz polimérica biobasada. Los efectos derivados del análisis de FTIR nos dicen que la interacción entre los Compositos utilizados, así como la correcta preparación de la materia prima, resultan en la coexistencia permanente de PSI la cual se encuentra observado en la banda 1714 cm^{-1} , junto el ensanchamiento en la región de hidroxilo 3290 cm^{-1} , y la definición en bandas alifáticas 2924 cm^{-1} , sugieren que los componentes se relacionan de manera constante predominando mecanismos físicos y puentes de hidrogeno. Estas interacciones permiten la liberación prolongada de AEO dentro del sistema.

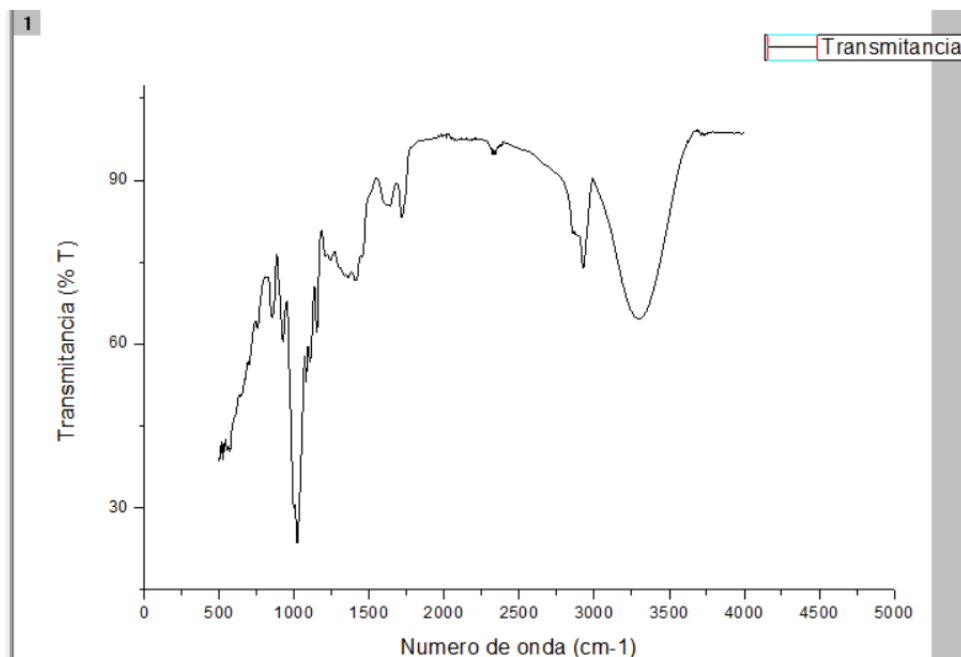


Figura 9, tratamiento A representación (elaboración propia)

7.1.1.4.2. Tb: MCS acetilada con AEO

En este tratamiento, La aparición conjunta de la banda de carbonilo éster a ~ 1714 y la banda de estiramiento ~ 1228 confirma que la MCA se incorporó homogéneamente con el almidón y el glicerol. Lo que otorgó la característica hidrofóbica al empaque la reducción relativa en el área de la banda de hidróxido sugiere que el empaque es más hidrofóbico. Esta menor afinidad por el agua es una propiedad altamente deseable para el envasado de alimentos, ya que suele correlacionarse con una mayor estabilidad frente a la humedad y una tasa de liberación controlada para los compuestos activos del aceite esencial de orégano (carvacrol y timol), los cuales quedaron atrapados eficientemente mediante interacciones hidrofóbicas

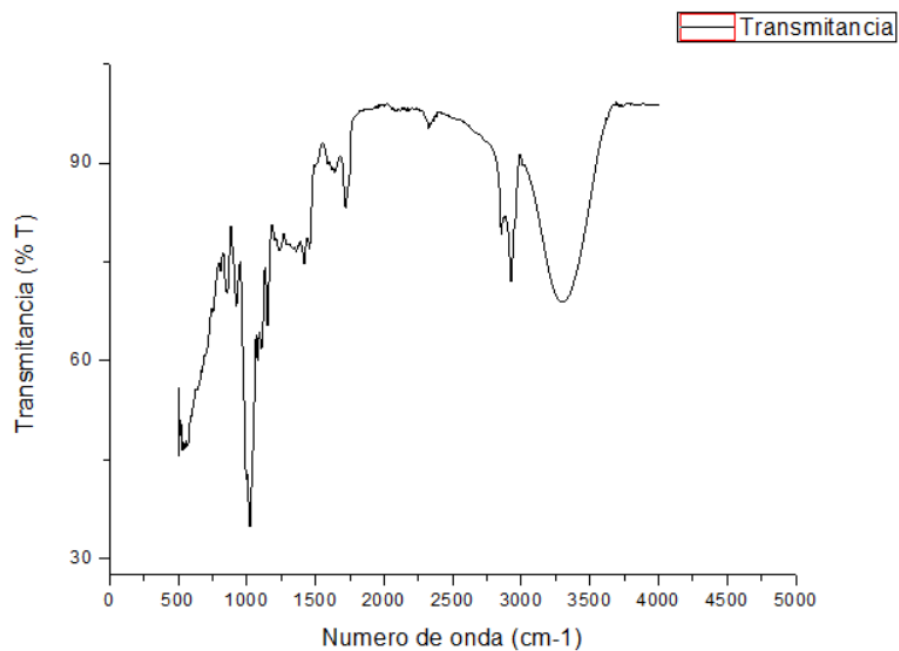


Figura 10 tratamiento b representación de R1, R2, R3 (elaboracion propia)

7.1.1.4.3. Tc: MCS sin acetilar sin AEO

Al contrastar la espectrofotometría con el tratamiento muestra que las señales del aceite esencial de orégano no aparecen en este tratamiento, lo que nos indica que la preparación. Este resultado indica que la matriz polimérica puede albergar un agente activo sin alterar la composición química de la misma.

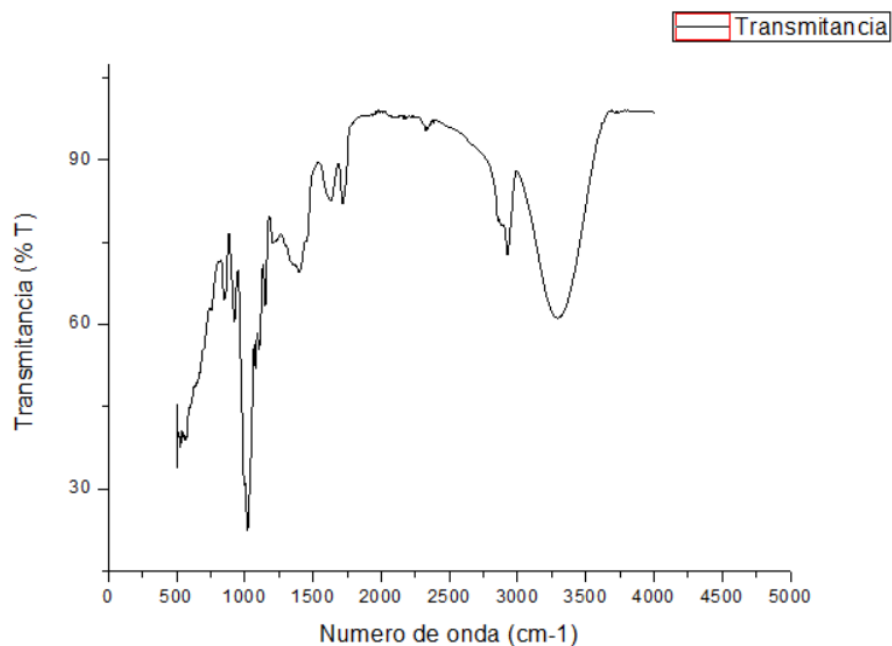


Figura 11 Tratamiento C representación de R1, R2 y R3 (elaboración propia)

7.1.1.4.4. TD: MCS acetilada sin AEO

En el Tratamiento D, se hace evidente que la incorporación de 50cetilación no altera la estabilidad química del enlace éster de la microcelulosa. Esta comparación contrastándola con el tratamiento B el cual contiene la misma matriz polimérica exceptuando el AEO permite concluir con rigor que el Tratamiento D funciona como una matriz receptora estable, cuya disminución en la hidrofilia establece las condiciones ideales para albergar y proteger compuestos volátiles mediante interacciones de naturaleza predominantemente hidrofóbica.

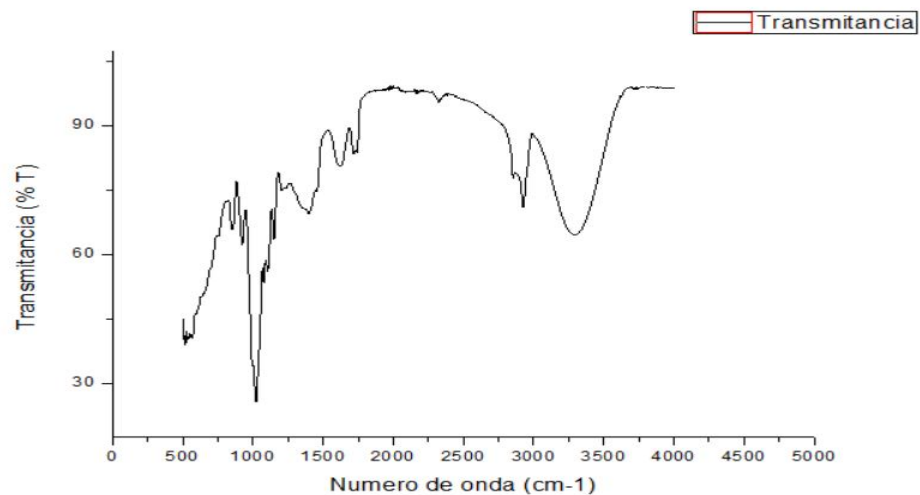


Figura 12 Tratamiento D representación de R1, R2 y R3

7.4.4. Características físicas del empaque

7.2 Etapa 2: Evaluación física

7.2.1 Análisis de humedad

Tabla 2. Humedad (%) de la carne molida de cerdo almacenada aeróbicamente a 4 °C en envases biodegradables a base de polisuccinimida (Elaboración propia)

Días de almacenamiento	A	B	C	D
0	67.87 ± 2.03 ^{Aa}	67.87 ± 2.03 ^{Aa}	67.87 ± 2.03 ^{Aa}	67.87 ± 2.03 ^{Aa}
4	55.53 ± 5.05 ^{Ba}	52.10 ± 1.57 ^{Ca}	59.53 ± 0.41 ^{Ba}	55.73 ± 2.90 ^{Ba}
7	58.60 ± 1.13 ^{Ba}	57.00 ± 1.67 ^{Ba}	59.50 ± 0.91 ^{Ba}	56.80 ± 2.35 ^{Ba}
10	56.16 ± 0.77 ^{Ba}	51.23 ± 1.00 ^{Cb}	57.23 ± 0.30 ^{Ba}	53.06 ± 0.90 ^{Bb}

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

en el mismo día de muestreo.

La humedad es uno de los parámetros fisicoquímicos más importantes en productos cárnicos, debido a que influye directamente sobre la textura, jugosidad, apariencia y estabilidad microbiológica del alimento. Durante el almacenamiento refrigerado, la pérdida de humedad puede ocurrir como consecuencia de procesos de exudación, cambios estructurales en las proteínas musculares y migración de agua hacia el ambiente, fenómenos que afectan negativamente la calidad del producto (Nair et al., 2024).

Los resultados de humedad de la carne molida de cerdo almacenada en los diferentes sistemas de empaque mostraron una disminución significativa ($p < 0.05$) respecto al día inicial en todos los tratamientos. Al inicio del almacenamiento, todas las muestras presentaron un contenido de humedad similar (67.87 %), mientras que al día 10 se observaron reducciones que oscilaron entre 51.23 y 57.23 %. Estos resultados evidencian que el almacenamiento aeróbico favorece la pérdida progresiva de agua, independientemente de la formulación del empaque.

Al analizar el comportamiento de cada tratamiento, se observó que la prueba C presentó los valores de humedad más elevados durante todo el periodo de almacenamiento, alcanzando 57.23 % al día 10, mientras que B mostró el menor contenido de humedad (51.23 %), presentando diferencias significativas ($p < 0.05$) respecto a los demás tratamientos al final del almacenamiento. Los tratamientos A y B mostraron valores intermedios de 56.16 y 53.06 %, respectivamente.

La mayor retención de humedad observada en los tratamientos elaborados con microcelulosa nativa puede atribuirse a la abundancia de grupos hidroxilo presentes en la estructura de la celulosa, los cuales poseen una elevada capacidad para establecer enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua y favorecer la retención hídrica dentro de la matriz polimérica (Hassan et al., 2022). En contraste, la acetilación de la microcelulosa sustituye parcialmente dichos grupos hidroxilo por grupos acetilo, incrementando la hidrofobicidad del material y reduciendo su afinidad por el agua (Li et al., 2023). Esta modificación estructural podría explicar la menor humedad observada en los tratamientos B y D durante el almacenamiento.

Por otra parte, la incorporación de aceite esencial de orégano también puede haber influido en la dinámica de retención de agua. Diversos autores han señalado que la incorporación de compuestos hidrofóbicos dentro de matrices poliméricas puede modificar la permeabilidad al vapor de agua y alterar los mecanismos de migración de humedad entre el alimento y el medio circundante (Souza et al., 2023). En el presente estudio, la combinación de microcelulosa acetilada y aceite esencial de orégano (B) produjo la mayor reducción del contenido de humedad, sugiriendo una interacción entre ambos componentes que pudo modificar las propiedades de barrera y transferencia de masa del sistema de empaque.

A pesar de la reducción observada, los valores de humedad registrados al final del almacenamiento permanecieron dentro de los rangos reportados para carne molida de cerdo refrigerada. Además, la conservación de mayores contenidos de humedad en A y C podría contribuir positivamente a mantener atributos sensoriales asociados con jugosidad y textura. Sin embargo, estos resultados deberán analizarse juntamente con los parámetros microbiológicos y de color, ya que una mayor retención de humedad no necesariamente implica una mejor estabilidad global del producto.

En términos generales, los resultados indican que la modificación química de la microcelulosa mediante acetilación influyó significativamente en la capacidad de retención de agua de los sistemas de empaque desarrollados. La microcelulosa nativa favoreció una mayor conservación de humedad durante el almacenamiento, mientras que la combinación de MCA y AEO generó las mayores pérdidas de agua. Estos hallazgos sugieren que las características hidrofílicas o hidrofóbicas de la matriz polimérica desempeñan un papel determinante en la regulación del intercambio de humedad entre el alimento y el ambiente durante el almacenamiento refrigerado.

7.2.2 Análisis de color

Tabla 3. Atributos de color de carne molida de cerdo almacenada aeróbicamente a 4 °C en envases biodegradables a base de polisuccinimida (Elaboración propia)

Días de almacenamiento	A	B	C	D
L				
0	57.33 ± 0.62 ^{Aa}	57.33 ± 0.62 ^{Aa}	57.33 ± 0.62 ^{Aa}	57.33 ± 0.62 ^{Aa}
4	55.06 ± 2.74 ^{ABa}	45.67 ± 0.20 ^{Bb}	54.44 ± 1.53 ^{Ba}	51.66 ± 1.53 ^{Ba}
7	53.70 ± 0.50 ^{ABa}	43.45 ± 0.35 ^{Cc}	52.65 ± 0.45 ^{Ba}	49.62 ± 0.47 ^{BCb}
10	51.84 ± 0.30 ^{Ba}	43.34 ± 1.03 ^{Cc}	50.12 ± 0.02 ^{Cb}	49.02 ± 0.48 ^{Cb}
a*				
0	11.12 ± 0.25 ^{Aa}	11.12 ± 0.25 ^{Ba}	11.12 ± 0.25 ^{ABa}	11.12 ± 0.25 ^{Aa}
4	9.40 ± 0.34 ^{Bb}	13.49 ± 0.37 ^{Aa}	11.92 ± 1.32 ^{Aa}	9.11 ± 0.77 ^{Bb}
7	8.00 ± 0.50 ^{Cbc}	11.25 ± 0.75 ^{Ba}	9.75 ± 0.75 ^{ABab}	7.75 ± 0.75 ^{BCc}
10	7.02 ± 0.48 ^{Cb}	10.58 ± 1.04 ^{Ba}	8.78 ± 1.19 ^{Bab}	6.92 ± 0.38 ^{Cb}
b*				
0	9.52 ± 0.58 ^{Ca}	9.52 ± 0.58 ^{Ba}	9.52 ± 0.58 ^{Ba}	9.52 ± 0.58 ^{Aa}
4	17.31 ± 0.01 ^{Bb}	22.92 ± 2.34 ^{Aa}	10.35 ± 0.75 ^{ABc}	10.04 ± 0.96 ^{Ac}
7	17.94 ± 0.07 ^{ABb}	24.64 ± 1.23 ^{Aa}	10.99 ± 0.25 ^{Ac}	11.17 ± 0.72 ^{Ac}
10	18.74 ± 0.85 ^{Ab}	25.31 ± 1.23 ^{Aa}	10.73 ± 0.48 ^{ABc}	11.18 ± 0.82 ^{Ac}

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

Los cambios en los atributos de color de la carne molida de cerdo durante el almacenamiento refrigerado constituyen uno de los indicadores más importantes de calidad y aceptación por parte del consumidor, debido a su estrecha relación con los fenómenos de oxidación lipídica y oxidación de pigmentos musculares. Los parámetros L*, a* y b* permiten evaluar modificaciones en la luminosidad, intensidad del color rojo y tonalidades amarillas de la carne, respectivamente. Diversos estudios han señalado que la estabilidad del color en productos cárnicos depende en gran medida de la capacidad de los sistemas de empaque para limitar los procesos oxidativos y preservar la integridad de la mioglobina (Nair et al., 2024; Rezaei et al., 2023).

Los valores de luminosidad (L*) mostraron una disminución significativa ($p < 0.05$) en todos los tratamientos conforme avanzó el almacenamiento, indicando una pérdida progresiva de brillo superficial asociada a cambios estructurales del tejido muscular y a fenómenos de oxidación. Este comportamiento ha sido reportado previamente en carnes almacenadas bajo refrigeración, donde la reducción de L* se relaciona con modificaciones en la capacidad de retención de agua, desnaturalización proteica y alteraciones superficiales provocadas por el deterioro oxidativo (Souza et al., 2023). Sin embargo, los tratamientos A y C

mantuvieron valores de luminosidad superiores a los observados en B, el cual presentó la mayor disminución de L^* a partir del día 4 de almacenamiento. Esta reducción podría atribuirse a una mayor interacción entre la microcelulosa acetilada y los compuestos fenólicos presentes en el aceite esencial de orégano, favoreciendo una menor reflectancia de la superficie de la carne.

Respecto al parámetro a^* , considerado uno de los indicadores más importantes de frescura debido a su asociación con la intensidad del color rojo, se observó una disminución significativa durante el almacenamiento en todos los tratamientos. La pérdida de valores de a^* generalmente se atribuye a la oxidación de la oximioglobina hacia metamioglobina, pigmento responsable de la coloración marrón característica de las carnes deterioradas (Nair et al., 2024). No obstante, el tratamiento B presentó los valores más elevados de a^* al final del almacenamiento (10.58), seguido de C (8.78), mientras que A y D registraron los valores más bajos (7.02 y 6.92, respectivamente). Estos resultados sugieren que la combinación de microcelulosa acetilada y aceite esencial de orégano favoreció una mayor estabilidad de los pigmentos musculares. Este comportamiento puede explicarse por la presencia de compuestos fenólicos como timol y carvacrol, reconocidos por su capacidad antioxidante para retardar la oxidación de la mioglobina y preservar el color rojo en productos cárnicos (Rezaei et al., 2023; Hassan et al., 2022). Asimismo, la modificación química de la microcelulosa mediante acetilación incrementa su carácter hidrofóbico, lo que podría mejorar la compatibilidad con el aceite esencial y favorecer una liberación más gradual de los compuestos antioxidantes hacia la superficie de la carne (Hassan et al., 2022).

En cuanto al parámetro b^* , se observó un incremento significativo durante el almacenamiento en los tratamientos que contenían AEO (A y B), siendo particularmente notable en B, donde los valores aumentaron de 9.52 a 25.31. Incrementos en b^* han sido reportados en sistemas activos incorporados con aceites esenciales debido a la presencia de compuestos fenólicos con tonalidades amarillentas y a la formación de productos secundarios derivados de reacciones oxidativas (Souza et al., 2023). Sin embargo, en el presente estudio el aumento de b^* ocurrió simultáneamente con una mejor conservación del parámetro a^* en B, lo que indica que la coloración amarilla observada no necesariamente estuvo asociada a un deterioro acelerado del producto, sino posiblemente a la presencia y

migración controlada de compuestos bioactivos provenientes del aceite esencial incorporado en el material de empaque.

En conjunto, los resultados demuestran que la incorporación de aceite esencial de orégano modifica significativamente la evolución de los atributos de color de la carne molida de cerdo durante el almacenamiento refrigerado. Particularmente, el tratamiento B presentó la mejor estabilidad del parámetro a*, considerado el principal indicador visual de frescura en productos cárnicos, lo que sugiere que la combinación de microcelulosa acetilada y aceite esencial de orégano favoreció una mayor protección frente a los procesos oxidativos. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Hassan et al. (2022), Rezaei et al. (2023) y Nair et al. (2024), quienes señalan que la incorporación de aceites esenciales en sistemas de empaque activo puede contribuir significativamente a la preservación de la calidad visual y al incremento de la vida útil de productos cárnicos almacenados bajo refrigeración.

7.3Etapa 3: Actividad microbiana
7.3.1 Evaluación de la actividad antimicrobiana contra patógenos alimentarios.

Tabla 4.Análisis microbiológico (Log10 UFC/g) de carne molia de cerdo almacenada aeróbicamente a 4 °C en envases biodegradables a base de polisuccinimida.

Días de almacenamiento	A	B	C	D
Coliformes totales				
0	6.36 ± 0.10 ^{Ba}	6.36 ± 0.10 ^{Da}	6.36 ± 0.10 ^{Ca}	6.36 ± 0.10 ^{Ca}
4	7.56 ± 0.24 ^{Aa}	7.83 ± 0.12 ^{Aa}	7.80 ± 0.03 ^{Aa}	7.76 ± 0.15 ^{Aa}
7	7.56 ± 0.01 ^{Ac}	7.35 ± 0.05 ^{Cd}	7.73 ± 0.08 ^{Ab}	7.90 ± 0.04 ^{Aa}
10	7.30 ± 0.01 ^{Aa}	7.60 ± 0.01 ^{Ba}	7.42 ± 0.10 ^{Ba}	7.26 ± 0.24 ^{Ba}
Staphylococcus aureus				
0	4.26 ± 0.24 ^{Da}	4.26 ± 0.24 ^{Da}	4.26 ± 0.24 ^{Da}	4.26 ± 0.24 ^{Da}
4	6.88 ± 0.17 ^{Bb}	6.85 ± 0.01 ^{Bb}	7.66 ± 0.06 ^{Ba}	7.81 ± 0.03 ^{Ba}
7	5.26 ± 0.24 ^{Cc}	5.62 ± 0.01 ^{Cb}	5.99 ± 0.01 ^{Ca}	6.07 ± 0.01 ^{Ca}
10	7.62 ± 0.15 ^{Ac}	7.41 ± 0.01 ^{Ad}	8.06 ± 0.02 ^{Ab}	8.34 ± 0.01 ^{Aa}
Mesófilos aerobios totales				
0	7.06 ± 0.05 ^{Aa}	7.06 ± 0.05 ^{Aa}	7.06 ± 0.05 ^{Ba}	7.06 ± 0.05 ^{Ca}
4	7.51 ± 0.30 ^{Ab}	7.68 ± 0.16 ^{Ab}	8.41 ± 0.17 ^{Aa}	8.60 ± 0.01 ^{Aa}
7	7.20 ± 0.17 ^{Ab}	7.50 ± 0.01 ^{Aa}	7.06 ± 0.02 ^{Bb}	7.00 ± 0.01 ^{Cb}
10	7.45 ± 0.03 ^{Aa}	7.55 ± 0.41 ^{Aa}	7.25 ± 0.24 ^{Ba}	7.59 ± 0.11 ^{Ba}

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

La evaluación microbiológica constituye una herramienta fundamental para determinar la efectividad de los sistemas de empaque activo en la preservación de alimentos altamente perecederos como la carne de cerdo. En el presente estudio se analizaron los recuentos de coliformes totales, *Staphylococcus aureus* y mesófilos aerobios totales durante el almacenamiento refrigerado de carne molida de cerdo en envases biodegradables elaborados a partir de polisuccinimida incorporada con microcelulosa nativa o acetilada y aceite esencial de orégano.

En el caso de los coliformes totales, todos los tratamientos mostraron un incremento significativo ($p < 0.05$) durante el almacenamiento respecto al día inicial. Los recuentos aumentaron de valores iniciales de 6.36 Log₁₀ UFC/g hasta alcanzar concentraciones entre 7.26 y 7.90 Log₁₀ UFC/g. Sin embargo, al día 7 se observaron diferencias significativas entre tratamientos, donde B (microcelulosa acetilada + aceite esencial de orégano) presentó el menor recuento (7.35 Log₁₀ UFC/g), seguido por A (7.56 Log₁₀ UFC/g), mientras que D alcanzó el valor más elevado (7.90 Log₁₀ UFC/g). Estos resultados sugieren que la incorporación del aceite esencial de orégano contribuyó a limitar parcialmente el crecimiento de bacterias coliformes durante el almacenamiento. Diversos estudios han demostrado que los compuestos fenólicos presentes en el aceite esencial de orégano, particularmente carvacrol y timol, alteran la permeabilidad de la membrana celular bacteriana, provocando pérdida de componentes intracelulares y disminución del crecimiento microbiano (Lorenzo et al., 2022; Kurek et al., 2023).

Los recuentos de *Staphylococcus aureus* evidenciaron un comportamiento más sensible a los tratamientos evaluados. A partir del día 4 se observaron diferencias significativas entre los tratamientos con y sin aceite esencial. Los tratamientos A y B presentaron menores recuentos respecto a C y D durante todo el almacenamiento. Al día 10, B mostró un valor de 7.41 Log₁₀ UFC/g, mientras que D alcanzó 8.34 Log₁₀ UFC/g. Esta reducción cercana a una unidad logarítmica confirma el efecto antimicrobiano del aceite esencial de orégano frente a bacterias Gram positivas. La elevada susceptibilidad de *S. aureus* frente a compuestos fenólicos ha sido ampliamente documentada y se atribuye a la interacción de estos metabolitos con la membrana citoplasmática, provocando alteraciones en la homeostasis celular y pérdida de viabilidad bacteriana (Ribeiro-Santos et al., 2023). Adicionalmente, el mejor desempeño observado en B sugiere que la acetilación de la

microcelulosa pudo favorecer una liberación más eficiente o sostenida de los compuestos bioactivos contenidos en el aceite esencial.

Respecto a los mesófilos aerobios totales, los recuentos se mantuvieron dentro de un intervalo relativamente estrecho durante el almacenamiento, observándose diferencias menos pronunciadas entre tratamientos. No obstante, al día 4 los tratamientos sin aceite esencial (C y D) registraron los valores más elevados (8.41 y 8.60 Log₁₀ UFC/g, respectivamente), mientras que los tratamientos con aceite esencial presentaron menores concentraciones microbianas. Este comportamiento indica que la incorporación de aceite esencial de orégano contribuyó a retrasar el crecimiento de la microbiota aerobia inicial. Sin embargo, debido a que los mesófilos aerobios representan un grupo heterogéneo de microorganismos con diferentes mecanismos de resistencia, el efecto inhibitorio observado fue menor que el registrado para *S. aureus*. Resultados similares han sido reportados en sistemas de empaque activo incorporados con aceites esenciales, donde la reducción de microorganismos específicos suele ser más evidente que la disminución de la microbiota total (Raeisi et al., 2022).

De manera general, los resultados microbiológicos demuestran que la incorporación de aceite esencial de orégano mejoró la capacidad antimicrobiana de los envases biodegradables desarrollados. Particularmente, los tratamientos A y B mostraron una mayor eficacia para limitar el crecimiento de coliformes totales y *Staphylococcus aureus* durante el almacenamiento refrigerado. El tratamiento B, elaborado con microcelulosa acetilada y aceite esencial de orégano, presentó consistentemente los menores recuentos para la mayoría de los grupos microbianos evaluados, lo que sugiere una posible mejora en la liberación controlada de compuestos antimicrobianos derivada de la modificación química de la microcelulosa. Estos hallazgos confirman el potencial de los sistemas de empaque activo basados en biopolímeros funcionalizados con aceites esenciales para prolongar la vida útil microbiológica de productos cárnicos refrigerados.

8. CONCLUSIONES

Se logró obtener y caracterizar satisfactoriamente los materiales base, permitiendo así la fabricación de los empaques mediante procesos de extrusión y termoformado generando estructuras con adecuada integridad física para su aplicación en la conservación de productos cárnicos. Asimismo, la caracterización mediante FTIR confirmó la presencia de los grupos funcionales característicos de los componentes incorporados y evidenció las modificaciones estructurales derivadas del proceso de acetilación, verificando la obtención exitosa de los materiales y la viabilidad tecnológica del sistema de empaque desarrollado.

La evaluación de las propiedades físicas de la carne molida de cerdo almacenada en los empaques desarrollados mostró que la modificación química de la MC influyó significativamente en la dinámica de transferencia de humedad y en la estabilidad del color. Los tratamientos elaborados con MCN presentaron una mayor capacidad de retención de humedad, mientras que los tratamientos formulados con MCA mostraron una menor afinidad por el agua. En cuanto al color, la combinación de MCA y AEO permitió conservar de manera más eficiente la intensidad del color rojo (a^*), atributo estrechamente relacionado con la percepción de frescura del producto.

La incorporación de aceite esencial de orégano confirió actividad antimicrobiana a los empaques desarrollados, observándose una reducción en el crecimiento de coliformes totales, *Staphylococcus aureus* y microorganismos mesófilos aerobios respecto a los tratamientos sin agente activo. El efecto inhibitorio fue más evidente frente a *Staphylococcus aureus*, lo que confirma la capacidad antimicrobiana de los compuestos fenólicos presentes en el aceite esencial.

El tratamiento formulado con MCA y AEO presentó el mejor desempeño integral durante el almacenamiento refrigerado de la carne de cerdo, al favorecer simultáneamente la estabilidad microbiológica y la conservación de los atributos visuales del producto. Aunque la acetilación redujo la capacidad de retención de humedad de la matriz, esta modificación mejoró la funcionalidad del sistema activo, potenciando la acción antioxidante y antimicrobiana del AEO.

Los resultados obtenidos demuestran que los empaques activos biodegradables desarrollados poseen potencial para su aplicación en la conservación de productos cárnicos

refrigerados, constituyendo una alternativa tecnológica con perspectivas de contribuir a la sustitución parcial de materiales convencionales derivados del petróleo y al desarrollo de sistemas de envasado más sostenibles.

9. LITERATURA CITADA

- Acosta-Pérez, V. J., Zamudio-Flores, P. B., Ornelas-Paz, J. D. J., Palma-Rodríguez, H. M., Juárez-Muñoz, J., & Vargas-Torres, A. (2019). Effects of native and modified starches on the physicochemical and textural properties of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fish burgers. *CYTA - Journal of Food*, 17(1), 207–213. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1574903>
- Acuña Idrogo. (2019). *Acuña Idrogo I. (2019). Tecnología de la carne y productos carnicos p2.*
- Ahmed, I., Lin, H., Zou, L., Brody, A. L., Li, Z., Qazi, I. M., Pavase, T. R., & Lv, L. (2017). A comprehensive review on the application of active packaging technologies to muscle foods. In *Food Control* (Vol. 82, pp. 163–178). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.06.009>
- Akwetey, W. Y., & Knipe, C. L. (2012). Sensory attributes and texture profile of beef burgers with gari. *Meat Science*, 92(4), 745–748. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.06.032>
- Alirezalu, K., Pirouzi, S., Yaghoubi, M., Karimi-Dehkordi, M., Jafarzadeh, S., & Mousavi Khaneghah, A. (2021). Packaging of beef fillet with active chitosan film incorporated with ϵ -polylysine: An assessment of quality indices and shelf life. *Meat Science*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108475>
- Andrade, M. A., Barbosa, C. H., Souza, V. G. L., Coelho, I. M., Reboleira, J., Bernardino, S., Ganhão, R., Mendes, S., Fernando, A. L., Vilarinho, F., Silva, A. S., & Ramos, F. (2021). Novel active food packaging films based on whey protein incorporated with seaweed extract: Development, characterization, and application in fresh poultry meat. *Coatings*, 11(2), 1–12. <https://doi.org/10.3390/coatings11020229>
- Aziman, N., Jawaid, M., Mutalib, N. A. A., Yusof, N. L., Nadrah, A. H., Nazatul, U. K., Tverezovskiy, V. V., Tverezovskaya, O. A., Fouad, H., Braganca, R. M., Baker, P. W., Selbie, S., & Ali, A. (2021). Antimicrobial potential of plastic films incorporated with sage extract on chicken meat. *Foods*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/foods10112812>
- Brochot, A., Guilbot, A., Haddioui, L., & Roques, C. (2017). Antibacterial, antifungal, and antiviral effects of three essential oil blends. *MicrobiologyOpen*, 6(4). <https://doi.org/10.1002/mbo3.459>

- Burt, S. (2004). Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods - A review. In *International Journal of Food Microbiology* (Vol. 94, Number 3, pp. 223–253). <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.022>
- Domínguez, R., Barba, F. J., Gómez, B., Putnik, P., Bursać Kovačević, D., Pateiro, M., Santos, E. M., & Lorenzo, J. M. (2018). Active packaging films with natural antioxidants to be used in meat industry: A review. *Food Research International*, 113, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.073>
- El-Din Ahmed Bekhit, A., Morton, J. D., Bhat, Z. F., & Zequan, X. (2018). Meat Colour: Chemistry and Measurement Systems. In *Encyclopedia of Food Chemistry* (pp. 211–217). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22419-0>
- Espinoza-Acosta. (2021). *Universidad de Sonora*. <http://biotecnica.unison.mx>
- Fang, Z., Zhao, Y., Warner, R. D., & Johnson, S. K. (2017). Active and intelligent packaging in meat industry. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 61, pp. 60–71). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.002>
- Gañán, P., Zuluaga, R., Castro, C., Restrepo-Osorio, A., Cock, J. V., Osorio, M., Montoya, Ú., Vélez, L., Álvarez, C., Correa, C., & Molina, C. (n.d.). *CELULOSA: UN POLÍMERO DE SIEMPRE CON MUCHO FUTURO*.
- García Iglesias, Gago Cabezas, & Fernández Nuevo. (2006). *vt3_tecnologías_de_envasado_en_atmosfera_protectora*.
- Hassan, B., Chatha, S. A. S., Hussain, A. I., Zia, K. M., & Akhtar, N. (2022). Recent advances on polysaccharide-based active packaging incorporated with essential oils for food preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 209, 1485–1503.
- Hernández-Pérez, I. A., Hernández-González, M., Vega-Rios, A., Chávez-Martínez, A., Rentería-Monterrubio, A. L., Sánchez-Vega, R., Rodríguez-Hernández, A. M., Morales-Ovando, M. A., & Tirado-gallegos, J. M. (2025). Effect of the Addition of Acetylated Polysaccharides on the Properties of an Active Packaging Based on Polysuccinimide and Oregano Essential Oil. *Polymers*, 17(21). <https://doi.org/10.3390/polym17212903>
- Hyldgaard, M., Mygind, T., & Meyer, R. L. (2012). Essential oils in food preservation: Mode of action, synergies, and interactions with food matrix components. *Frontiers in Microbiology*, 3(JAN). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00012>.
- Li, Y., Zhang, H., Wang, S., Chen, J., & Liu, Y. (2023). Surface modification of cellulose and nanocellulose for food packaging applications: Recent advances and future

- perspectives. *Carbohydrate Polymers*, 315, 120954.
- Lockhart, H. E. (1997). ‡ The Coming of Age of Packaging, keynote address, AUSPACK '89 Seminars. In *PACKAGING TECHNOLOGY AND SCIENCE* (Vol. 10).
- Lorenzo, J. M., Munekata, P. E. S., Domínguez, R., Pateiro, M., & Barba, F. J. (2022). Natural antimicrobial compounds as alternatives to conventional preservation methods in meat products: A review. *Food Research International*, 157, 111390.
- Kurek, M., Hlupic, L., Galus, S., & Debeaufort, F. (2023). Active packaging systems containing essential oils for microbial quality preservation of meat products. *Food Packaging and Shelf Life*, 38, 101121.
- Nair, M. S., Tomar, M., Punia, S., Kukula-Koch, W., & Kumar, M. (2024). Essential oil-based active packaging systems for improving shelf life and quality of meat products: Current status and future trends. *Foods*, 13(2), 315.
- paine. (1991). The Packaging User's Handbook. In *The Packaging User's Handbook*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1483-7>
- Priyadarshi, R., & Rhim, J. W. (2020). Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications. In *Innovative Food Science and Emerging Technologies* (Vol. 62). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102346>
- Raeisi, M., Tajik, H., Razavi-Rouhani, S. M., & Maham, M. (2022). Antimicrobial effects of active biodegradable films incorporated with plant essential oils on refrigerated poultry meat. *LWT – Food Science and Technology*, 154, 112709.
- Rai, P., Mehrotra, S., Priya, S., Gnansounou, E., & Sharma, S. K. (2021). Recent advances in the sustainable design and applications of biodegradable polymers. In *Bioresource Technology* (Vol. 325). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124739>
- Rezaei, M., Ojagh, S. M.,
- Razavi, S. H., & Hosseini, S. M. H. (2023). Application of oregano essential oil in active food packaging systems and its effects on meat quality attributes during refrigerated storage. *Food Control*, 145, 109462.
- Ribeiro-Santos, R., Andrade, M., Melo, N. R., & Sanches-Silva, A. (2023). Use of oregano essential oil as a natural antimicrobial agent in food preservation systems: Mechanisms of action and recent advances. *Foods*, 12(8), 1645.
- Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., & Rosa, M. D. (2008). Biodegradable polymers for food packaging: a review. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 19, Number 12, pp. 634–643). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>

- Souza, V. G. L., Pires, J. R. A., Vieira, É. T., Coelho, I. M., & Fernando, A. L. (2023). Active packaging based on biopolymers and essential oils for meat preservation: A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 36, 101056.
- Yam, 2005. (n.d.).
- Yang, X., Li, A., Li, X., Sun, L., & Guo, Y. (2020). An overview of classifications, properties of food polysaccharides and their links to applications in improving food textures. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 102, pp. 1–15). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.020>

10. ANEXOS