



FABRICACIÓN DE PELÍCULA SOPLADA ADITIVADA CON UN ACEITE ESENCIAL

BAJO LA OPCIÓN:
TITULACIÓN INTEGRAL
(TESIS)

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:
DULCE ELENA ORDOÑEZ GONZALEZ

ASESOR:
MTRA. ELODIA CLAUDIA GUERRERO ORTIZ

SINODALES:
MTRA. MA. JUANA ARRIAGA GÓMEZ
ING. IVAN RICARDO ROSALES BARAJAS

Pachuca de Soto, Hgo. ABRIL 2026

54 páginas





Instituto Tecnológico de Pachuca
Depto. de Ing. Química y Bioquímica

Pachuca de Soto, Hgo., 20/Marzo/2026
Oficio No. DIQyB/019/2026

Asunto: ACEPTACIÓN DE TEMA Y OPCIÓN

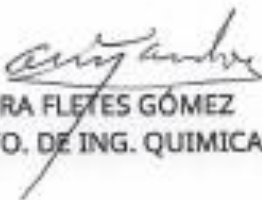
C. DULCE ELENA ORDOÑEZ GONZALEZ
PRESENTE

Con el presente me permito informarle que el tema Fabricación de película soplada aditivada con un aceite esencial ha sido ACEPTADO para ser presentado por la opción TITULACIÓN INTEGRAL (TESIS) contemplada en la normatividad vigente para tal efecto.

Por lo anterior se le ha designado como asesora a la MTRA. ELODIA CLAUDIA GUERRERO ORTIZ como comisión revisora a la MTRA. MA. JUANA ARRIAGA GÓMEZ e ING. IVAN RICARDO ROSALES BARAJAS. Una vez hecha la revisión final se liberará por dicho comité para su impresión y proceder a sustentar al ACTO DE RECEPCIÓN PROFESIONAL.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"


DRA. ALEJANDRA FLEITES GÓMEZ
JEFE DEL DEPTO. DE ING. QUÍMICA Y BIOQUÍMICA



c.c.p. archivo
AFQ/bfa



2026
año de
**Margarita
Maza**





Instituto Tecnológico de Pachuca
Depto. De Ing. Química y Bioquímica

Pachuca de Soto, Hidalgo 17/Abril/2026

No. de Oficio: DIQ/019/2026

Asunto: Liberación para el Acto de Recepción Profesional

C. DULCE ELENA ORDOÑEZ GONZALEZ, No. de Control: 18201020
Egresada del Programa Educativo de Ingeniería Química y Bioquímica
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberada para el Acto de recepción profesional:

Nombre del Proyecto:	Fabricación de película soplada aditivada con un aceite esencial
Producto/Tema:	TITULACIÓN INTEGRAL (TESIS)

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"®

DRA. ALEJANDRA FLETES GÓMEZ
JEFA DEL DEPTO. DE ING. QUÍMICA Y BIOQUÍMICA



c.c.p. Expediente.

ITPAC-AC-PO-008-06



AGRADECIMIENTOS TÉCNICOS

Para el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) por la oportunidad de realizar mis prácticas profesionales en sus instalaciones, con el fin de desarrollar el proyecto de investigación y por el fomento a la investigación a nivel licenciatura.

Para el LANIAUTO por pertenecer a un grupo de líderes, por fortalecer mi confianza, extender mi sabiduría, manejar mis sentimientos y por ser un grupo de apoyo. Para los colaboradores Dra. Zureima García Hernández, Dr. José Francisco Hernández Gámez, Dr. Pablo Gonzales Morones y Dr. Alejandro Garza Santibañez.

Para el Departamento de Materiales Avanzados y Procesos de Transformación de Plásticos del CIQA por facilitar las instalaciones, materiales y equipos prestados para llevar a cabo este trabajo.

Para el personal técnico, al Dr. Jesús Francisco Lara Sánchez por su apoyo y por facilitar el material necesario para la realización de la parte experimental de la presente tesis, al I.Q. Guadalupe Méndez Padilla y a la M. en C. Myrna Salinas Hernández por su apoyo en la realización de los análisis TGA y DSC, a la Dra. Julieta Sánchez Salazar por su apoyo en la capacitación del uso del equipo de espectroscopia infrarroja, a la I.Q. Myriam Lozano Estrada, Lic. Jesús Ángel Cepeda Garza e Ing. Jesús Gilberto Rodríguez Velázquez por su apoyo en la realización del análisis SEM.

Con profunda estima y reconocimiento, extendiendo mi más sincero reconocimiento a mis asesores externos Dr. Ernesto Hernández Hernández y Dra. Pamela Celeste Flores Silva e interno Mtra. Elodia Claudia Guerrero Ortiz, por su invaluable contribución a la elaboración de esta tesis, cuyas observaciones han sido cruciales para la preparación de este documento. Sus conocimientos, su calidad de visión y habilidad para proporcionar orientación precisa han sido fundamentales para dar forma a cada palabra y párrafo de este documento. Su perspicacia crítica y su capacidad para identificar áreas de oportunidad han sido de inmenso valor en la calidad de este trabajo y en mi formación académica.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mis padres, Francisca González Barrera y Ausencio Ordoñez Badillo, por su amor, por su constante apoyo hacia mí a lo largo de mi trayectoria académica, sin ustedes este trabajo no sería posible pues su sacrificio y dedicación me han permitido llegar hasta aquí. Espero se sientan orgullosos de este logro como yo lo estoy de ser su hija.

A mi abuela María Elena Badillo Benítez, gracias por tu cariño, amor, paciencia, por ser la persona que siempre ha sostenido mi mano, por el apoyo incondicional, por siempre cuidarme y procurarme a lo largo de mi vida.

A mi hermana Jasmín Montserrat Hans González, por el apoyo incondicional que siempre has tenido conmigo, porque es la persona a la que más admiro y por compartirme su pasión de viajar.

A mis tías Guadalupe González Barrera, Sandra Ordoñez Badillo y Rosalba Ordoñez Badillo, por siempre estar, por siempre apoyarme a la distancia y cercanía, les agradezco estar conmigo en este logro, son las mujeres más fuertes y valientes que conozco, por sus palabras de aliento, por estar en cada una de mis victorias a lo largo de mi vida.

A mi familia, amigos y personas que me han acompañado en el crecimiento profesional, quienes me dieron la oportunidad de estar en sus vidas, siempre recordaré con mucho cariño.

Agradezco a la vida y a Dios, por ser una serie de circunstancias que me posicionan en el lugar en donde estoy, soy fiel creyente que no existen las casualidades y todo pasa por algo.

DEDICATORIA

Para mis padres, les agradezco profundamente su amor incondicional y su apoyo constante. Su fe en mí ha sido el motor que me permitió completar este camino. Esta trayectoria ha sido larga y difícil, pero es el comienzo de algo mejor, por siempre agradecido con ustedes.

Para Fernando Valente Hans González, mi hermano, porque este trabajo es un reflejo del esfuerzo y dedicación que me hubiera encantado que estuviera presente en vida.

Para mi abuelo Ausencio Ordoñez Badillo, porque le prometí culminar mis estudios con éxito y que ahora no es posible que esté aquí para disfrutarlo.

Para mis sobrinos Sofía Ángeles Galarza, Luis Fernando Guzmán Hans, Ian Said González Galarza, Nicolas Paredes Ordoñez, Emiliano Ángeles Galarza, Thiago André Lugardo Godínez y Angelloh Zantino Peña Hernández, porque han sido mi motor para superarme y por el cariño incondicional que tengo hacia ellos.

ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

BCD:	β -ciclodextrina
CD:	Ciclodextrina
TEO:	Aceite esencial de Tomillo
IC:	Complejo de inclusión
ICT:	Complejo de inclusión de aceite esencial de Tomillo
PP:	Polipropileno
LDPE:	Low-density polyethylene por sus siglas en inglés. Polietileno de Baja Densidad.
HDPE:	High-density polyethylene por sus siglas en inglés. Polietileno de Baja Densidad.
PBAT:	Polibutileno de teraftalato adipato
DPPH:	2,2-difenil-1-picrilhidracilo
TGA:	Thermogravimetric Analysis por sus siglas inglés. Análisis Termogravimétrico.
FTIR:	Fourier Transform Infrared Spectroscopy por sus siglas en inglés. Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier.
DSC:	Differential Scanning Calorimetry por sus siglas en inglés. Calorimetría Diferencial de Barrido.
MEB:	Microscopía Electrónica de Barrido.

RESUMEN

La implementación de empaques activos ha tenido un auge importante en los últimos años, ya que se busca incrementar la vida de anaquel de alimentos perecederos. En el presente trabajo se encapsuló aceite esencial de tomillo (TEO en β -ciclodextrina (BCD) mediante ultrasonido para formar un complejo de inclusión y posteriormente se prepararon compuestos mediante mezclado en fundido usando como matriz polimérica al polietileno de baja densidad y finalmente se soplaron las películas mediante extrusión por soplado. Se prepararon películas a distintas concentraciones de complejo de inclusión de tomillo (ICT) a 1%,2%,3% y 4% en peso con respecto a la matriz. Se encontró que los complejos de inclusión (IC) presentaron una alta estabilidad térmica y una adecuada dispersión en la matriz de LDPE durante la extrusión. Además, se obtuvieron exitosamente las películas sopladas con los compuestos de inclusión y se encontró que las películas con 1% y 4% mostraron el mejor desempeño mecánico y propiedades de permeabilidad al vapor de agua y al oxígeno. Las películas obtenidas, tienen el potencial de inhibir el crecimiento de patógenos como el *Penicillium ssp.* en alimentos como el pan; por lo que se podría extender la vida de anaquel de este alimento.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS TÉCNICOS.....	i
AGRADECIMIENTOS PERSONALES	ii
DEDICATORIA	iii
ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA.....	iv
RESUMEN.....	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1Planteamiento del problema	1
1.2Objetivo General	2
1.3Objetivos Específicos	2
1.4Justificación.....	3
1.5Hipótesis	4
Capítulo 2 FUNDAMENTO TEÓRICO	5
2.1Empaques activos	6
2.2Complejo de inclusión	8
2.2.1 β -ciclodextrina.....	11
2.2.2 Aceite Esencial.....	13
2.2.3 Métodos de formación de complejo de inclusión	15
2.3Polietileno de baja densidad.....	18
2.4Película soplada	23
2.5Propiedades antifúngicas de películas a base de LDPE	25
Capítulo 3 METODOLOGÍA.....	26
3.1Materiales y sustancias	26
3.2Metodología	26

3.2.1	Preparación del complejo de inclusión	26
3.2.2	Preparación de compuestos.....	27
3.2.3	Preparación de películas.....	28
3.3	Técnicas de caracterización	29
3.3.1	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	29
3.3.2	Análisis Termogravimétrico (TGA).....	29
3.3.3	Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	29
3.3.4	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	30
3.3.5	Propiedades mecánicas	30
3.3.6	Permeabilidad	31
Capítulo 4	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	32
4.1	Caracterización de los complejos de inclusión.....	32
4.1.1	Análisis de Electroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier “FTIR”	32
4.1.2	Propiedades térmicas de complejos de inclusión	33
4.1.3	Análisis Microscopía Electrónica de Barrido “MEB”	35
4.2	Caracterización de películas.....	36
4.2.1	Análisis de Electroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier “FTIR”	36
4.2.2	Análisis Termogravimétrico “TGA”	37
4.2.3	Análisis Calorimetria Diferencial de Barrido “DSC”	38
4.2.4	Análisis MEB	40
4.2.5	Análisis de propiedades mecánicas	42
4.2.6	Análisis de permeabilidad	43
CONCLUSIONES		44
TRABAJO A FUTURO		45
BIBLIOGRAFÍA.....		46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 "Tipos de Ciclodextrinas más empleadas"	9
Tabla 2.2 "Métodos de formación de complejos de inclusión"	16
Tabla 2.3 "Propiedades del LDPE"	18
Tabla 2.4 "Artículos científicos donde se reportó la inhibición al crecimiento de patógenos en películas con aceites esenciales"	25
Tabla 3.1 "Nomenclatura utilizada para cada una de las muestras preparadas"	27
Tabla 4.1 "Propiedades térmicas de películas activas"	40
Tabla 4.2 "Propiedades mecánicas de películas"	42
Tabla 4.3 "Permeabilidad de películas"	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 "Formación de complejo de inclusión"	8
Figura 2.2 "Tipos de ciclodextrinas"	9
Figura 2.3 "Representación esquemática de las principales relaciones estequiometrías de los complejos de inclusión"	10
Figura 2.4 "β-ciclodextrina"	11
Figura 2.5 "Equipo de ultrasonido con punta"	17
Figura 2.6 "Polietileno de Baja Densidad"	18
Figura 2.7 "Estructura del LDPE"	19
Figura 2.8 Pan inoculado con <i>P. commune</i> , película activa tricapa (izquierda) y en película de control (derecha), después de 12 días de almacenamiento a 20 °C	21
Figura 2.9 Paquetes de pan con película control y película tratada. El moho se muestra como esporas verdes y manchas borrosas en la muestra de control.	23
Figura 2.10 "Fabricación de película soplada obtenida en el CIQA"	24
Figura 3.1 "Complejo de inclusión antes y después del secado"	27
Figura 3.2 "Muestras después de cámara de mezclado"	28
Figura 3.3 "Fabricación de película soplada mediante extrusión por soplado"	28

Figura 4.1 Espectros de FTIR de aceite esencial de tomillo (TEO), β -ciclodextrina (BCD) y complejo de inclusión de tomillo (ICT)	32
Figura 4.2 Termogramas de TGA de materiales de aceite esencial de tomillo (TEO), β -ciclodextrina (BCD) y complejo de inclusión de tomillo (ICT)	34
Figura 4.3 Termogramas de DSC de la β -ciclodextrina (BCD) y el complejo de inclusión de tomillo (ICT)	35
Figura 4.4 Micrografías de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de la β -ciclodextrina (BCD) y complejo de inclusión de tomillo (ICT)	36
Figura 4.5 Espectros de FTIR de películas sopladas por extrusión.....	37
Figura 4.6 Termograma de TGA de las películas fabricadas por extrusión	38
Figura 4.7 a) Termograma de enfriamiento de películas y b) Termograma del segundo calentamiento de películas	39
Figura 4.8 Micrografías de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de las películas a 2000X y 4000X	41

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El pan es un alimento esencial a nivel mundial para la humanidad, y su deterioro causado por hongos durante el almacenamiento es uno de los grandes retos que afronta la industria panificadora. Gran parte de la contaminación microbiana proviene de las materias primas, que se reduce durante la cocción, pero otra buena parte es producto de la re-contaminación durante el proceso de empaquetado. En Europa las pérdidas económicas asociadas a la presencia de hongos en el pan ascienden a 200 millones de euros anualmente (García et al., 2019). Este deterioro no solo provoca pérdidas económicas, sino que también puede representar un riesgo para la salud humana.

Frente a esta problemática, la incorporación de películas plásticas flexibles combinadas con aceites esenciales, conocidas por sus propiedades antimicrobianas y antioxidantes, surge como una alternativa innovadora (Hassan et al., n.d.). Estas películas no solo prolongan la vida útil de los alimentos al reducir la necesidad de conservantes químicos, sino que también representan un enfoque más sostenible para la conservación y protección de productos perecederos, minimizando el impacto ambiental asociado al envasado tradicional (Shi et al., 2022).

La encapsulación de aceite esencial de tomillo utilizando β -ciclodextrina es una técnica innovadora y eficiente que ofrece múltiples beneficios. La β -ciclodextrina es una molécula cíclica derivada del almidón, tiene la capacidad de formar complejos de inclusión con compuestos bioactivos, como los aceites esenciales, protegiéndolos de factores externos como la oxidación, la luz y la temperatura (Shen et al., 2024).

En el caso del aceite esencial de tomillo, rico en compuestos antimicrobianos y antioxidantes, su encapsulación con β -ciclodextrina mejora su estabilidad, prolonga su vida útil y facilita su manejo e incorporación en aplicaciones alimentarias y farmacéuticas (Marques, 2010).

Además, esta técnica permite una liberación controlada de los componentes activos, lo que aumenta su eficacia en la conservación de alimentos o en formulaciones terapéuticas. Por ello, la encapsulación con β -ciclodextrina representa una herramienta clave para maximizar el potencial de los aceites esenciales como alternativas naturales a los conservantes sintéticos.

Al utilizar LDPE (Polietileno de Baja Densidad) como matriz, se logra una integración efectiva en materiales plásticos flexibles, lo que permite desarrollar empaques activos con capacidad para prolongar la vida útil de productos perecederos (Janczak et al., 2022). Esta combinación no solo mejora la funcionalidad del material de empaque, sino que también reduce la necesidad de conservantes químicos, promoviendo soluciones más sostenibles y eficientes.

El objetivo del presente trabajo fue incorporar aceites esenciales en una matriz de polietileno para fabricar una película soplada capaz de inhibir el crecimiento de microorganismos patógenos y minimizar la oxidación de los alimentos, protegiendo así su frescura y calidad.

Este enfoque no solo mejora la seguridad alimentaria, sino que también responde a la creciente demanda por empaques sostenibles y naturales en la industria, brindando soluciones innovadoras para la reducción de aditivos sintéticos y la preservación de alimentos de manera más eficiente.

1.2 Objetivo General

Obtener prototipos de película soplada aditivada con un aceite esencial antifúngico para la factibilidad de uso en la industria alimentaria.

1.3 Objetivos Específicos

- Elaborar complejos de inclusión a base de β -ciclodextrina y aceite esencial de tomillo mediante la técnica ultrasónica (QSONICA SONICATORS, potencia de 500 W y 60% de amplitud).

- Caracterizar estructuralmente la β -ciclodextrina y complejo de inclusión de tomillo mediante las técnicas TGA, FTIR, DSC y MEB.
- Fabricar prototipos de película soplada con β -ciclodextrina y complejo de inclusión de tomillo mediante extrusión de película soplada.
- Evaluar las propiedades térmicas, morfológicas y estructurales de las películas con β -ciclodextrina y complejo de inclusión de tomillo mediante TGA, FTIR, DSC, pruebas de tensión y pruebas de permeabilidad.

1.4 Justificación

La gestión de productos perecederos, como pan, carnes, lácteos, y otros alimentos de corta vida útil, es fundamental para asegurar la seguridad alimentaria. El desperdicio de alimentos representa un problema económico y ambiental, debido a que implica la pérdida de recursos utilizados en su producción y afecta la seguridad alimentaria a lo largo de toda la cadena de suministro (BBVA, s.f.).

El pan es uno de los productos alimenticios más consumidos por la población mundial y asegurar su calidad para el consumidor es un aspecto clave para cuidar la salud de los seres humanos.

Las empresas y expendedores tienen la responsabilidad ética de garantizar que los alimentos que se ofrecen o consumen sean seguros. Desechar productos perecederos contaminados es una acción de responsabilidad social que refleja compromiso con la salud y el bienestar de la comunidad.

Además, la presencia de patógenos en alimentos perecederos y permitir su consumo pone en riesgo la vida y la salud de las personas, lo cual es inaceptable desde un punto de vista ético.

La seguridad del consumidor debe ser siempre la máxima prioridad, y la eliminación adecuada de alimentos contaminados es esencial para garantizar un suministro de alimentos seguro y fiable.

En este proyecto se propone fabricar prototipos de película soplada con aceites esenciales antimicrobianos, con lo cual se pretende inhibir el crecimiento de patógenos y alargar la vida de anaquel de productos perecederos para contribuir en la seguridad alimentaria.

1.5 Hipótesis

La adición de β -ciclodextrina (B-CD) o complejos de inclusión durante la extrusión de bolsa soplada de Polietileno de Baja Densidad (LDPE) no afectará negativamente el proceso de fabricación de las películas. Además, la presencia de B-CD o de los complejos de inclusión no afectará negativamente las propiedades térmicas, morfológicas y estructurales de las películas, lo que permitirá obtener empaques con propiedades adecuadas para su uso en la industria alimentaria.

Capítulo 2 FUNDAMENTO TEÓRICO

En los últimos años, ha aumentado el desperdicio de alimentos principalmente de productos perecederos como el pan. Este es un problema que afecta a todas las etapas de la cadena alimentaria y puede ocurrir desde la recolección de materia prima, pasando por las industrias de procesamiento, la distribución y llegando a los hogares de los consumidores. Las razones detrás de estas pérdidas varían según el tipo de alimento, la etapa de producción, el almacenamiento, el transporte y el embalaje.

En el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente “PNUMA” en el año de 2022, calculó que entre el 8 % y el 10 % de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero están asociadas a alimentos que nunca se consumieron (Gobierno de México, 2022).

Por ello, la importancia que tienen los envases para la reducción del desperdicio de alimentos, especialmente en productos perecederos al emplear nuevas tecnologías; el diseñar empaques eficientes que puedan desempeñar un papel clave en la prevención de este problema, contribuyendo a la conservación adecuada de los alimentos y ayudando a prolongar su vida útil.

La mayor parte de los materiales de envasado tradicionales empleados en la industria alimentaria están compuestos por polímeros no biodegradables, los cuales generan contaminación ambiental y, en algunos casos, pueden afectar la calidad de los alimentos que los contienen (Annu et al., 2021). En la actualidad, surgen nuevas tendencias con el objetivo de mejorar la funcionalidad de estos materiales de empaque mediante el desarrollo de materiales inteligentes, estos incorporan diversos componentes activos como agentes antimicrobianos, antioxidantes, aromatizantes, colorantes y nanopartículas, entre otros, con el fin de optimizar su desempeño (Shah et al., 2014). Asimismo, el aumento en la demanda de los consumidores por materiales de empaques activos que mantengan la calidad de los alimentos ha impulsado a los investigadores a buscar alternativas más sostenibles y seguras para el medio ambiente.

Existen investigaciones donde demuestran la viabilidad tecnológica de producir sistemas de envasado de alimentos antimicrobianos que contengan aceites esenciales donde emplean diferentes tipos de transportadores. Por lo tanto, optimizar el empaque se presenta como un elemento crucial para enfrentar el desafío del desperdicio alimentario (TFG- Carranza, Gonzalo, n.d.).

2.1 Empaques activos

Es un sistema de embalaje que incorpora componentes que absorben o liberan sustancias en los alimentos envasados. En la actualidad, es una innovación clave para mantener la calidad y frescura por más tiempo, para poder alargar su vida de anaquel reduciendo pérdidas. Los empaques activos son capaces de controlar la humedad y evitar el crecimiento de moho utilizando agentes esenciales para preservar los productos perecederos.

Estos envases están diseñados no sólo para contener el producto, sino también para interactuar con él, regulando factores como el crecimiento de microorganismos (Manobanda Jiménez, 2023). Al mantener el pan en condiciones óptimas durante más tiempo, estos envases mejoran la experiencia del consumidor al gusto, y además contribuyen a una gestión más eficiente y sostenible de los empaques (Luis Del Río et al., n.d.).

La fabricación de películas poliméricas que contienen aceites esenciales, son fabricadas típicamente mediante extrusión y sus aplicaciones abarcan los sectores de farmacéutica, alimentaria, agrícola y medicina (Massad-Ivanir et al., 2023).

El envasado activo es desarrollado para inhibir el crecimiento de microorganismos que provocan enfermedades y el deterioro de los alimentos, se presentan como una tecnología prometedora. Su objetivo es prolongar la vida útil de los productos, garantizar la seguridad alimentaria, reducir el desperdicio y disminuir los riesgos de enfermedades transmitidas por los alimentos (Krepker et al., 2017). Los empaques activos están compuestos por una matriz que implementan complejos de inclusión,

estos complejos tienen como función encapsular algún agente y la matriz es el polímero que se utiliza para la realización de la misma.

Los envases activos con propiedades antibacterianas ayudan a garantizar la seguridad y prolongan la vida útil de los alimentos durante el almacenamiento, mientras que los envases antioxidantes se enfocan en evitar reacciones de oxidación y los envases anti-UV protegen contra la radiación ultravioleta, los envases antibacterianos están diseñados específicamente para combatir la contaminación microbiana (Guan et al., 2024).

Previamente en la literatura, se han fabricado películas bicapa adicionando Atapulgita con aceite esencial de *Allium Sativum* utilizando como matriz LDPE y PP, por el método de extrusión de película soplada para proteger corvina amarilla. Esta película que contiene Atapulgita y *Allium Sativum*, conserva efectivamente la corvina amarilla, y además incrementa su frescura y extiende su vida útil a 5 días a una temperatura de $4 \pm 1^{\circ}\text{C}$ (Dong et al., 2019).

En otro trabajo, se desarrollaron películas utilizando como matriz LDPE, arcillas de montmorillonita modificadas orgánicamente, para encapsular el carvacrol. Los autores, demostraron que las películas de LDPE/ (arcilla/ carvacrol) exhiben actividad antibacteriana contra *Escherichia coli* y *Listeria innocua*; mientras que el polímero que contiene solo carvacrol pierde propiedades antibacterianas en 6-8 días. Por lo tanto, dichas películas con matriz de LDPE tienen un alto potencial para ser aplicadas en envases de alimentos (Shemesh et al., 2015).

Como se describió previamente, la fabricación de empaques activos, representan una solución tecnológica innovadora que responde a la demanda de alimentos más seguros, saludables y de mayor calidad. Además, cumplen con uno de los objetivos de desarrollo sostenible: “Producción y consumo responsable”. No obstante, su implementación en el mercado aún enfrenta desafíos técnicos, logísticos y de costos (Yildirim et al., 2018).

2.2 Complejo de inclusión

Es un complejo químico que está compuesto por una molécula llamada "anfitrión" esta tiene una cavidad o red cristalina en la que se aloja otro compuesto, por otro lado, la molécula "huésped" es el agente activo, formando una interacción no covalente (*Figura 2.1*)

El anfitrión tiene como objetivo proteger ciertas propiedades de las moléculas huésped, la molécula anfitriona generalmente son ciclodextrinas debido a la cavidad hidrofóbica e hidrofílica que contienen.

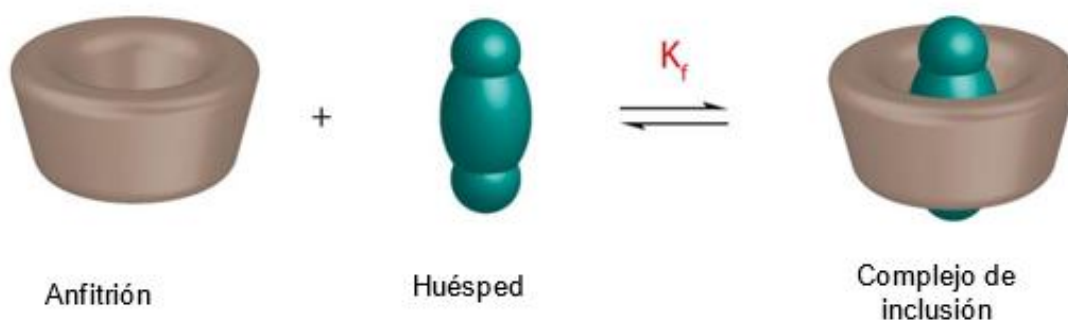


Figura 2.1 "Formación de complejo de inclusión"

Fuente: (Kfoury et al., 2018)

Las ciclodextrinas representan una opción factible y eficiente para retener y modular la liberación de los volátiles encapsulados (Kfoury et al., 2018) tienen propiedades fisicoquímicas de las moléculas huésped, pues temporalmente se bloquean dentro de la cavidad del huésped e imparte actividad eficiente de las moléculas huésped que solo así se pueden aprovechar.

Las moléculas naturales más comunes con forma de anillo son de las ciclodextrinas son: α – (alfa), β - (beta) y γ - (gamma), están formadas unidades de glucosa (*Tabla 2.1*)

Tabla 2.1 "Tipos de Ciclodextrinas más empleadas"

Tipo de ciclodextrina	Descripción
α -CD	Formada por seis unidades de glucosa, tiene una cavidad interna pequeña, lo que limita el tamaño de las moléculas que puede alojar. Se usa en aplicaciones farmacéuticas para encapsular compuestos pequeños y mejorar su estabilidad y solubilidad en agua.
β -CD	Con siete unidades de glucosa, posee una cavidad de tamaño intermedio, lo que la hace versátil y ampliamente utilizada en la industria farmacéutica, cosmética y alimentaria. Es ideal para encapsular moléculas de tamaño moderado, como compuestos aromáticos o ciertos fármacos.
γ -CD	Contiene ocho unidades de glucosa, lo que le da la cavidad más amplia entre las tres. Es capaz de alojar moléculas de mayor tamaño y es altamente soluble en agua. Se emplea en aplicaciones donde se requiere encapsular compuestos más grandes, como ciertos lípidos y vitaminas liposolubles.

Creación propia (Ordoñez, 2024)

En la *Figura 2.2*, se muestran las ciclodextrinas, α -CD, β -CD y γ -CD, que muestran sus dimensiones de cavidad son 0.57 nm, 0.78 nm y 0.95 nm respectivamente, y de altura todas tienen 0.78 nm. En el interior de las ciclodextrinas se muestra la cavidad apolar, en la parte inferior se encuentra lado primario y en parte superior es el lado secundario.

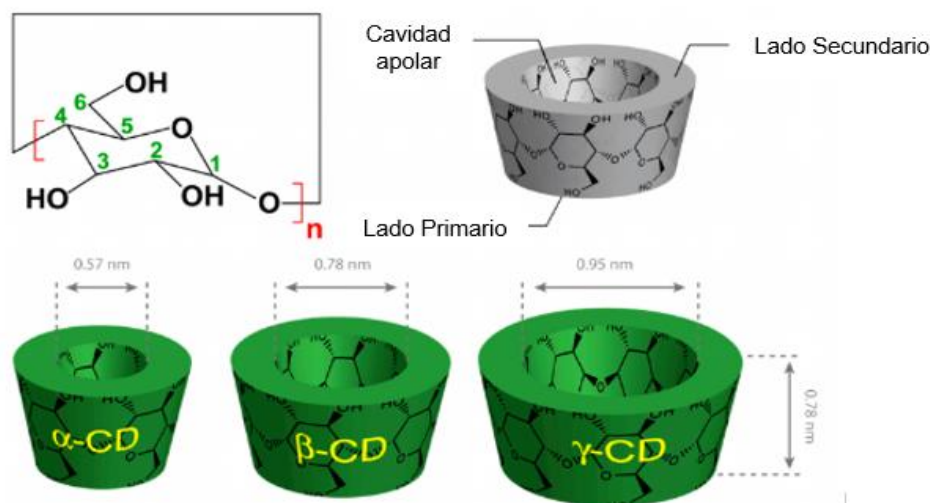


Figura 2.2 "Tipos de ciclodextrinas"

Fuente: (Jeandet et al., 2021)

Por esta razón, la β -CD se emplea extensamente en la industria alimentaria para mantener la estabilidad de ciertos componentes, preservando así sabores, colores o vitaminas de ingredientes específicos (Marques, 2010).

El análisis cuantitativo de la fuerza de unión entre el anfitrión y el huésped es la determinación de la constante de formación de cada complejo de inclusión (Kfoury et al., 2018).

Los principales aditivos encapsulados en la industria de alimentos son: ácidos, colorantes, pigmentos, enzimas, microorganismos, sabores, especies. El aceite esencial se debe encapsular debido a su alta volatilidad y estas requieren ser protegidas para después aprovechar las propiedades que cada una tiene.

El método de encapsulación y la relación estequiométrica entre el anfitrión : huésped, (Figura 2.3). Se elige de acuerdo a la aplicación requerida, el tamaño de cápsula deseado, el material a encapsular, el costo y las propiedades físicas y químicas del recubrimiento (Químico -Aspirante et al., n.d.).

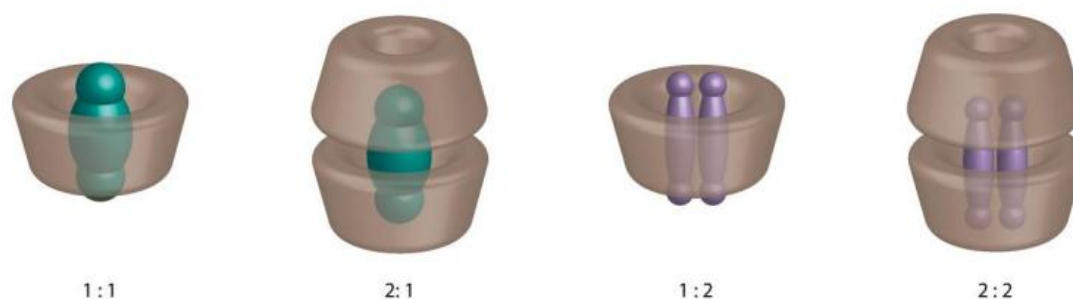


Figura 2.3 "Representación esquemática de las principales relaciones estequiometría de los complejos de inclusión"

Fuente: (Kfoury et al., 2018).

La encapsulación del aceite esencial es una técnica que maximiza su efectividad y aplicabilidad, ofreciendo beneficios en términos de estabilidad, solubilidad y control de liberación (Kfoury et al., 2018). Por ejemplo, en el trabajo de Ju y colaboradores, demostraron que el encapsulado de aceites esenciales en nanotubos de Halloysita y soportados en bolsitas (por su traducción en inglés, sachets) tienen las capacidades de incrementar la vida de anaquel del pan de 5 días para la muestra

de referencia y hasta 13 y 15 días cuando contenían el aceite esencial encapsulado en los sachets. Adicionalmente, demostraron que independiente del tipo de empaque el mayor efecto se logra por la presencia del aceite esencial encapsulado (LDPE, PP, HDPE) (Ju et al., 2020).

2.2.1 β -ciclodextrina

La β -ciclodextrina, es un oligosacárido cíclico con una estructura de forma cónica que tiene una cavidad hidrofóbica capaz de formar complejos de inclusión con moléculas huésped, como aceites esenciales. Esta capacidad de encapsular moléculas volátiles o compuestos lipofílicos dentro de su estructura proporciona una barrera efectiva contra la volatilización y la degradación por factores ambientales, como el oxígeno y la luz.

En la *Figura 2.4*, se muestra esquemáticamente la β -ciclodextrina, en la que se observa que tiene una estructura de cavidad interna hidrófoba y externa hidrófila única (Shen et al., 2024). Este es uno de los materiales de pared de encapsulación más utilizados en la industria alimentaria, farmacéutica, cosmética, textil y minera. En la industria alimentaria tiene aplicaciones como estabilizante, espesante y vehículo de otras sustancias en productos (Szejtli, 2004).

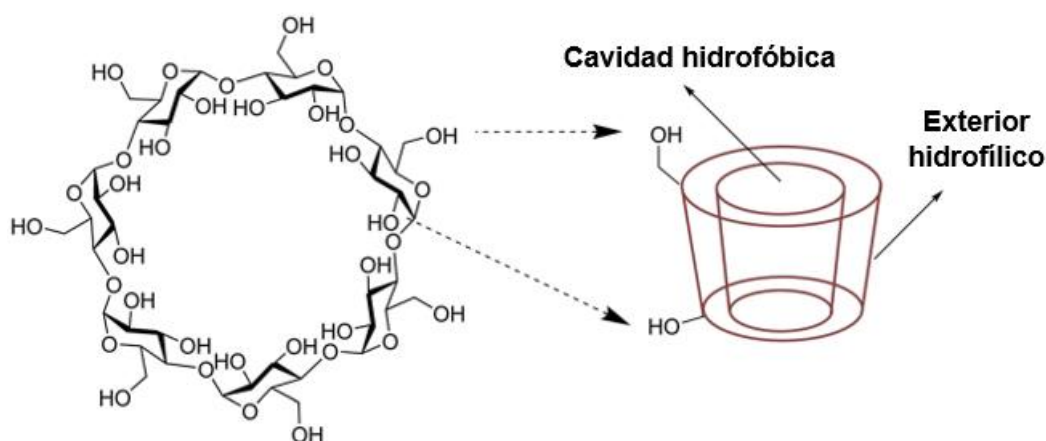


Figura 2.4 "β-ciclodextrina"

Fuente: (Qiu et al., 2017)

Al encapsular una molécula huésped dentro de su cavidad, la β -ciclodextrina la protege de factores externos como la luz, el oxígeno, la humedad o el calor. Esta protección prolonga la estabilidad y evita la degradación o volatilización de la molécula huésped, como es el caso de los aceites esenciales.

En la actualidad, el utilizar este agente encapsulante para el desarrollo de materiales de envasado activos antimicrobianos es importante para la industria alimentaria. El autor Abarca y colaboradores, explican que la mayoría de los compuestos antimicrobianos son volátiles y requieren protección (Abarca et al., 2016).

Por otra parte, Guan y colaboradores, realizaron una β -ciclodextrina como material pared para encapsular aceite esencial. Alcanzaron una eficiencia de incrustación del 86.80%, el rendimiento de aceite fue 12.65% y presentó inhibición de *E. coli* y *Staphylococcus aureus* de 17.1 mm y 16.7 mm, respectivamente. Por lo tanto, la película de envasado de liberación sostenida desarrollada con alta hidrofobicidad podría ser adecuada para entornos de alta humedad (Guan et al., 2024).

Se reportó otro documento, en el cual se preparó un complejo de inclusión utilizando β -ciclodextrina para encapsular aceite esencial de limón y se aplicó en moras. Se encontró, que estos complejos retrasaron el crecimiento antifúngico contra *R. stolonifer* del 3.41% y contra *B. Cinerea* el 25% y también retrasó el deterioro del color de las moras (Shi et al., 2023).

En otro trabajo, se encapsularon aceite esencial de tomillo (TEO) en β -ciclodextrina (BCD) y se estudiaron la liberación controlada del TEO. Los autores, encontraron que los encapsulados de TEO en BDD inhiben el crecimiento de *Alternaria alternata*. Estos encapsulados inhibieron el crecimiento de esta bacteria a 21 días en condiciones de incubación a 25°C. De esta manera, los autores propusieron que este encapsulado tiene el potencial de ser utilizado en el área agrícola (del Toro-Sánchez et al., 2010).

También, Shi y colaboradores, realizaron encapsulados de nanofibras electrohiladas, a partir de policaprolactona y ácido poliláctico. Para la fabricación de envases activos para alimentos, utilizaron aceite esencial de orégano en β -

ciclodextrina, para su aplicación en moras azules. Estos encapsulados de aceite esencial de tomillo en ambas nanofibras, presentaron actividad antibacteriana y antifúngica contra *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*, respectivamente (Shi et al., 2022)

De acuerdo a la revisión sobre los documentos en donde utilizan las β -ciclodextrinas para encapsular aceites esenciales, han demostrado su capacidad contra el crecimiento de hongos y bacterias. Por lo tanto, estos encapsulados aplicados a diversas matrices poliméricas (sintéticos y naturales) tienen el potencial de proteger e incrementar el tiempo de vida de anaquel de los alimentos.

2.2.2 Aceite Esencial

Tomillo

El aceite esencial de tomillo *Thymus vulgaris*, es rico en compuestos como el timol y el carvacrol. Los fenoles son los componentes principales de este aceite, y el timol destaca por sus valiosas propiedades. Se ha comprobado que las especies de *Thymus* poseen potentes efectos antibacterianos, antifúngicos, antivirales, antiparasitarios, espasmolíticos y antioxidantes (Hassan et al., n.d.). Su eficacia ha sido estudiada frente a hongos como *Penicillium* y *Aspergillus Niger*, mostrando actividad antifúngica, especialmente cuando se utiliza en productos alimentarios como pasteles y panes para prevenir el crecimiento de hongos (Radünz et al., 2019). Tanto el timol como el carvacrol inhiben el desarrollo de hongos al modificar sus membranas celulares, lo que puede provocar la ruptura de las mismas.

Además, el aceite de tomillo posee propiedades antioxidantes que ayudan a proteger las células del daño oxidativo, lo que amplía su aplicación tanto en la salud como en la industria alimentaria y cosmética. Los aceites esenciales son fuentes potenciales de nuevos compuestos antimicrobianos, especialmente contra patógenos bacterianos (Radünz et al., 2019).

Un aspecto en la tecnología de alimentos es el uso de compuestos antimicrobianos en diversas aplicaciones, entre las que destaca el desarrollo de materiales de

envasado activos con propiedades antimicrobianas; la mayoría de los compuestos antimicrobianos son volátiles y requieren protección.

En la actualidad, existen investigaciones sobre la incorporación de extractos naturales y aceites esenciales para mejorar las propiedades funcionales de películas, con el objetivo de innovar envasado que pueda inhibir el crecimiento microbiano en los alimentos.

Por ejemplo, en el trabajo reportado por Ardjoum y colaboradores, fabricaron películas antimicrobianas. Utilizaron como matriz el PLA adicionando aceite esencial de tomillo y extracto de etanólico de propóleo con concentraciones de 5 y 10% por si solas y combinadas; emplearon el método de difusión en disco de agar. En las películas con extracto de etanólico de propóleo, obtuvieron una inhibición de 12.1 y 11.58 contra *Staphylococcus aureus* y *Penicillium sp.*, respectivamente. Por otro lado, en las películas con 10% de aceite esencial de tomillo inhibieron el crecimiento de *Candida albicans*. También, la combinación de aceite esencial de Tomillo y extracto de etanólico de propóleo, presentó efecto sinérgico contra *Escherichia coli* (Ardjoum et al., 2021).

Otro ejemplo, Peixoto y colaboradores, fabricaron bandejas para carne con fibras de zeína encapsulando aceite esencial de tomillo. Con el objetivo de controlar el crecimiento de patógenos. Estos autores, demostraron que inhibieron el crecimiento de *Escherichia coli* y *Staphylococcus*, las fibras electrohiladas mostraron potencial antioxidante para el desarrollo de empaques activos para productos cárnicos (Peixoto et al., 2023).

En un trabajo reportado previamente por Dorofte y colaboradores, prepararon el complejo de inclusión de TEO en β -ciclodextrina, usando el método de coprecipitación con relaciones estequiometrias de 8.5:1.5 y 8.5:3.0 de β -ciclodextrina en TEO. Como resultado encontraron actividad antifúngica contra *Geotrichum candidum* y *Rhodotorula glutinis*; y actividad antibacteriana contra *Bacillus cereus* con la relación 8.5:3.0. Dados los resultados obtenidos por estos autores, propusieron la utilidad de estos encapsulados para aplicaciones en alimentos (Dorofte et al., 2024).

También el aceite esencial de tomillo se ha utilizado para fabricar envases activos para tomates, a partir de proteína de soya. En las pruebas experimentales de estos sistemas se demostró la inhibición contra *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*. Además; se demostró que la película con concentración de 2.4 g / 100 g de TEO, es la que tuvo la mayor conservación durante el almacenamiento de hasta 16 días (Liu et al., 2024).

En el mismo sentido, Almasi y colaboradores fabricaron películas antimicrobianas utilizando alginato de calcio que contiene TEO. Dichas películas liberaron el TEO en 155 min e inhibieron el crecimiento de *S. aureus* y *E. coli* en pruebas antimicrobianas *in vitro*. Los autores demostraron que podrían aumentar la vida útil de carne picada mediante el control de la población microbiana (Almasi et al., 2020).

Lo descrito anteriormente, demuestra que el aceite esencia de tomillo encapsulado en las ciclodextrinas, tiene actividad antimicrobiana y antifúngica; por lo que demostrar su efecto sinérgico en películas plásticas delgadas para la protección de alimentos es un tema de interés actual para la sociedad.

2.2.3 Métodos de formación de complejo de inclusión

Existen distintos métodos para poder realizar complejos de inclusión, la elección de estos depende de las propiedades físico-químicas del compuesto huésped, las características de la ciclodextrina, la estabilidad del complejo deseada y las condiciones prácticas de producción (Cid-Samamed et al., 2022) (*Tabla 2.2*).

Tabla 2.2 "Métodos de formación de complejos de inclusión"

Método	Descripción
Ultrasonido	Se utiliza, cuando se desea promover una mejor mezcla y dispersión del huésped y la ciclodextrina en solución. Para la encapsulación rápida de aceites esenciales, antioxidantes y otros compuestos bioactivos.
Coprecipitación	Se agrega con agitación, una solución de etanol que contiene el huésped a las ciclodextrinas disueltos en agua, es adecuado para sustancias no solubles en agua, posteriormente se enfría la solución y ocurre la cristalización y precipitación. Se destaca por su simplicidad y eficiencia.
Mezclado en masa	Las ciclodextrinas rigurosamente pesadas, se mezclan con una pequeña cantidad de agua purificada para obtener una pasta y luego, el huésped se incorpora a la pasta con un mezclado minucioso.
Liofilización	Se congela la solución de ciclodextrina y compuesto huésped y luego se liofiliza (sublimación bajo vacío) para obtener un complejo en polvo seco. Sus aplicaciones son en encapsulaciones de compuestos termosensibles y volátiles.
Molienda	Se mezclan el compuesto huésped y la ciclodextrina en estado sólido y luego se trituran o muelen para inducir la formación del complejo. Sus encapsulaciones se basan en compuestos sensibles a solventes o humedad.
Dióxido de carbono supercrítico	La cantidad requerida de ciclodextrinas y el huésped se introducen en una autoclave que está en termostato y presurizado con dióxido de carbono a una presión y temperatura específicas.
Secado por aspersión	Secuencia de tres pasos: la atomización de la alimentación líquida, el secado de gotas finas utilizando una corriente de aire caliente y un paso donde las partículas secas se separan de la corriente de aire. Sus aplicaciones son encapsulaciones de sabores, antioxidantes y otros compuestos en polvo.

Fuente: (Cid-Samamed et al., 2022)

Cada método tiene sus propias ventajas y desventajas según el tipo de compuesto y la aplicación final. El ultrasonido es adecuado para aplicaciones industriales a gran escala o con compuestos volátiles (Cid-Samamed et al., 2022).

Ultrasonido

El ultrasonido es una de las técnicas no térmicas, más empleadas para ayudar a la química verde sustentable. Las ondas ultrasónicas oscilan ente 20 kHz – 10 MHz (Kutlu et al., 2022).

El principio de funcionamiento de los equipos de ultrasonido, se basa en que las ondas son transmitidas a través de un medio líquido donde están disueltos el huésped y la molécula huésped (Shen et al., 2024). Durante el proceso, se crea la

cavitación acústica, en la cual las ondas ultrasónicas generan burbujas de cavitación en el medio líquido. Estas burbujas colapsan de manera rápida, creando áreas de alta temperatura (2000 - 5000 °K) y presión (30,000 - 120000 kPa) (Rahman & Lamsal, 2021) (Figura 2.5). Las condiciones dinámicas (tiempo, temperatura, amplitud, frecuencia) y energéticas, promueven en menor o mayor medida el contacto físico entre las moléculas huésped y el huésped. Por ejemplo, la ciclodextrina puede formar un complejo de inclusión con la molécula huésped al encapsularla en su cavidad hidrofóbica.

En la industria alimentaria se utiliza el ultrasonido para reducir el tiempo de procesamiento, mejorar la calidad y garantizar la seguridad de los productos (Majid et al., 2015). Una de las aplicaciones recientes del uso del ultrasonido es en la formación de complejos de inclusión de ciclodextrinas con aceites esenciales. Por ejemplo, en el trabajo desarrollado por Jiang y colaboradores, sintetizaron un complejo de inclusión de cuminaldehído con la ayuda del ultrasonido (baño de ultrasonido a 45 Hz) y demostraron que la formación de estos complejos mejoró la solubilidad en agua, estabilidad térmica y la actividad antibacteriana contra *Monilinia fructicola* (Jiang et al., 2021).



Figura 2.5 "Equipo de ultrasonido con punta"

Fuente: (Qsonica, s.f.)

2.3 Polietileno de baja densidad

Por sus siglas en inglés (Low Density Polyethylene) (*Figura 2.6*) es un polímero termoplástico que se aprovecha en la fabricación de diversos productos, como bolsas, envoltorios y láminas de plástico. Es semirrígido y químicamente inerte, tiene bajos niveles de cristalinidad, presenta propiedades físicas como: flexibilidad, translúcido, suave, liviano, resistencia química y al impacto (Shi et al., 2023). Estas propiedades lo hacen ideal para aplicaciones en las que se requiere una barrera protectora.

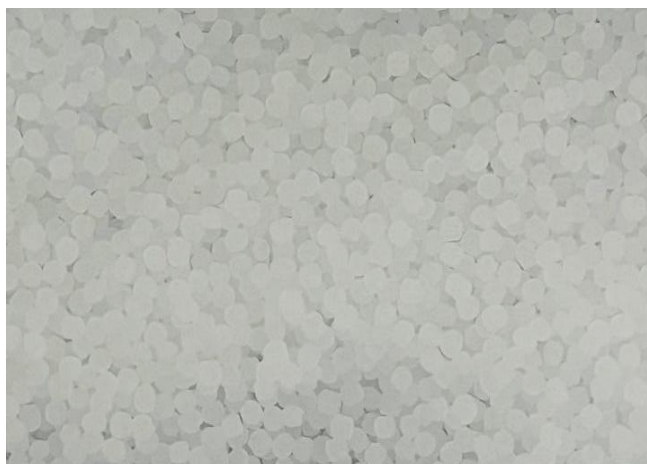


Figura 2.6 "Polietileno de Baja Densidad"

Creación propia (Ordoñez, 2024)

En la *Tabla 2.3*, se muestran los datos obtenidos de hoja técnica de especificación del polietileno baja densidad, grado PX-20020X por PEMEX.

Tabla 2.3 "Propiedades del LDPE"

Propiedades	LDPE
Temperatura de fusión	112°C
Densidad	1.8 – 2.3 g/cm ³
Índice de fluidez	0.9195 – 0.9220 g/10 min
Nebulosidad (en película de 0.0015 pulgadas del espesor)	5%
Resistencia al rasgado	65.6 / 90.5 N/mm
Resistencia al impacto por dardo	104.5 g
Resistencia a la tensión	17.8 / 15.2 MPa

Fuente: (PEMEX,s.f.)

El LDPE cumple con las normas de la Administración de Alimentos y Medicamentos que por sus siglas en inglés *FDA* y está disponible en varios grados alimentarios (Janczak et al., 2022), es un polímero de bajo costo con una excelente procesabilidad.

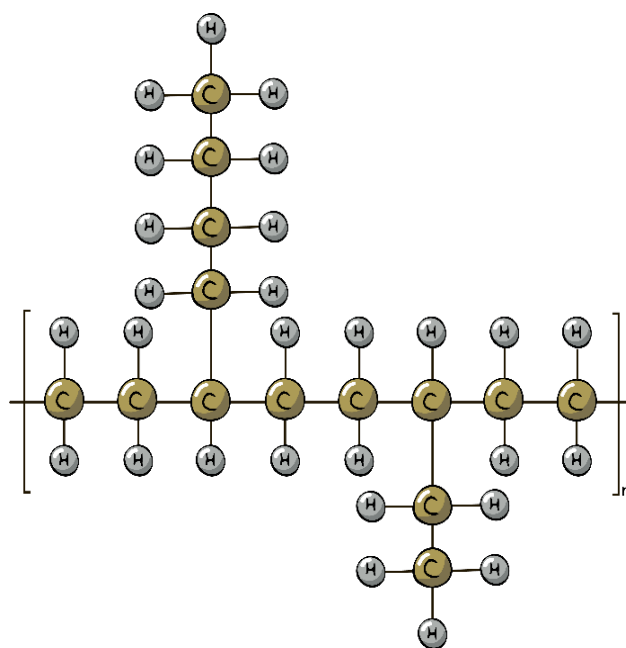


Figura 2.7 "Estructura del LDPE"

Fuente: (Estructura de LDPE, n.d.)

El LDPE se caracteriza por tener una estructura ramificada. Se crea a partir de un solo monómero el etileno, lo que lo clasifica como un homopolímero (Figura. 2.7).

Su estructura química presenta múltiples ramificaciones cortas y contiene entre 4,000 y 40,000 átomos de carbono (Videira-Quintela et al., 2022). Aunque conserva resistencia y durabilidad, es menos denso que otros polietilenos lineales, esto se debe a su alto grado de ramificación, tanto en cadenas laterales cortas como largas.

Las modificaciones y el uso de aditivos en el LDPE resultan fundamentales para ampliar su funcionalidad y responder a demandas específicas en diversas industrias. Al añadir aditivos, como estabilizadores UV, agentes antimicrobianos o plastificantes, el LDPE puede ofrecer mayor resistencia a la degradación, mejor

adaptabilidad en ambientes externos y una vida útil prolongada en aplicaciones exigentes, como en empaques alimentarios y materiales de construcción (Videira-Quintela et al., 2022). El impacto ambiental puede complicar el proceso de reciclaje y prolongar el tiempo de descomposición de los productos plásticos en el entorno. Por ello, el desarrollo de aditivos más sostenibles y métodos de reciclaje avanzados es crucial para mitigar los efectos ambientales del LDPE y reducir la acumulación de residuos plásticos, protegiendo así los ecosistemas y fomentando una economía más circular (Videira-Quintela et al., 2022).

Por lo tanto, el LDPE utilizado como matriz polimérica, puede proporcionar una estructura física y soporte para la formulación, al emplear un complejo de inclusión utilizando la β -ciclodextrina asegura la retención y protección del aceite esencial encapsulado.

La combinación de polietileno de baja densidad con β -ciclodextrina en la encapsulación de aceites esenciales es un avance innovador que mejora la estabilidad, la eficacia y el control de liberación de los compuestos activos, con un gran potencial en diversas industrias como la farmacéutica, alimentaria y cosmética.

Recientemente la industria alimenticia está demandando empaques con propiedades funcionales, por ejemplo, el pan y otros alimentos requieren que liberen sustancias para incrementar el tiempo de vida de anaquel de los productos, uno de las soluciones donde se está empleando el LDPE es combinarlo con aceites esenciales.

Por ejemplo, en el trabajo reportado por Massad-Ivanir y colaboradores, prepararon encapsulados de aceites esenciales en nanotubos de Halloysita y los adicionaron en LDPE a través en el mezclado en el estado fundido. Las condiciones de preparación de la película con los encapsulados fueron los siguientes: Preparación de nanotubos híbridos de Halloysita (HNT) /carvacrol: Se secaron los HNT a 150 °C por 12 h en 3 ciclos de vacío de 15 min cada uno, se agregó carvacrol a los HNT en una proporción de 1:1.5 HNT/carvacrol y se mezcló durante 30 min en un mezclador planetario. Posteriormente, se realizaron tres ciclos de vacío de 15 min.

Para la producción del concentrado (Masterbatch); el LDPE se mezcló con Etil Vinil Acetato (EVA) y un híbrido de HNT/ carvacrol a una relación de 0.66; en una extrusora de doble tornillo de 18 mm de diámetro a 140°C. Para la producción de compuestos, el LDPE se mezcló con el masterbatch activo utilizando una extrusora de doble husillo de 25 mm, velocidad del husillo de 300 rpm, velocidad de alimentación de 4 kg h⁻¹ con un gradiente de temperatura de 50–130 °C. Finalmente, para la producción de películas; el compuesto se diluyó con LDPE puro, con un contenido final de carvacrol de 0.75 % en peso. Se fabricó una película tricapa en un extrusores monohusillos, con un diámetro de 30 mm y dos extrusoras de 45 mm, a un gradiente de temperatura de 180–240 °C. Estos autores, demostraron que la película obtenida mostró una notable eficacia antimicrobiana contra *Penicillium Commune* (*P. commune*) en pruebas *in vitro*, con tiempos de almacenamiento de hasta 20 meses. Las películas obtenidas se probaron en pan y cerezas, y los autores encontraron que el tiempo de vida de anaquel del pan se incrementó en más del 73% y un incremento del 40% en cerezas comerciales. En la *Figura 2.9*, se muestran los panes inoculados que se envasaron en este trabajo; en donde se demuestra gráficamente el efecto positivo de las películas de polietileno con el aceite esencial (*carvacrol*). El crecimiento y la esporulación del moho son visibles en el pan envasado en la película de control como manchas blancas azuladas (Massad-Ivanir et al., 2023) .

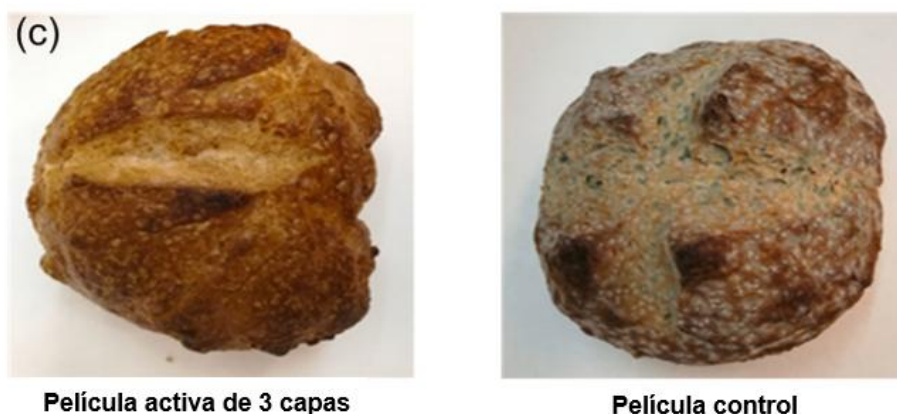


Figura 2.8 Pan inoculado con P. commune, película activa tricapa (izquierda) y en película de control (derecha), después de 12 días de almacenamiento a 20 °C

Fuente: (Massad-Ivanir et al., 2023)

Se ha demostrado en la literatura, que, al adicionar complejos de inclusión encapsulados con aceites esenciales en matrices poliméricas, se mejoran las propiedades antifúngicas y se incrementa el tiempo de vida de anaquel de los productos perecederos. Por ejemplo, Flores-Silva encapsularon aceites de naranja y tomillo en β -ciclodextrina tanto en ácido poli láctico (por sus siglas en inglés, PLA) y en polietileno de alta densidad post-consumo (por sus siglas en inglés, rHDPE). Los envases fabricados en PLA mostraron mayor rigidez que los envases rHDPE, y además presentó una mayor actividad antifúngica contra *Penicillium spp.* que el rHDPE (Flores-Silva et al., 2024). El PLA, es un biopolímero semicristalino con mayor rigidez que el rHDPE, debido a su estructura molecular.

Otro ejemplo, el autor Videira-Quintela y colaboradores, fabricaron películas ternarias (tres componentes), utilizaron como matriz LDPE reforzada con partículas micrométricas de plata, cobre y sílice pirolizada con hidroxinitrato de cobre. Los autores demostraron una mejora en la actividad microbiana contra patógenos (*Staphylococcus aureus* y *Salmonella*) principalmente en los compuestos con cobre (Videira-Quintela et al., 2022). Esto demuestra que las nanopartículas metálicas tienen efecto antimicrobiano y antihongos.

También, Dobrzynska-Mizera y colaboradores, propusieron un material innovador con características antimicrobianas, utilizando LLDPE con complejo de inclusión de β -ciclodextrina con limoneno. Demostraron que además de mejorar las propiedades antimicrobianas contra *Staphylococcus aureus* y *Salmonella entérica*; mejoró la turbidez y redujo el brillo de las películas (Dobrzyńska-Mizera et al., 2024).

En la actualidad, estas investigaciones sobre alternativas innovadoras en envases activos, se ha incrementado en los últimos años; para mejorar la conservación de los productos alimenticios. Por ejemplo, Pawde y colaboradores, fabricaron películas de LDPE al cuales se le adiciona 5% de hule natural; esto con la finalidad de capturar el oxígeno y activando este proceso mediante luz ultra-violeta. Bajo esta tecnología, se incrementó el tiempo de la vida útil de 4 a 5 días en pan y en queso khoa de 3 días (Pawde et al., 2023) (Figura. 2.10).

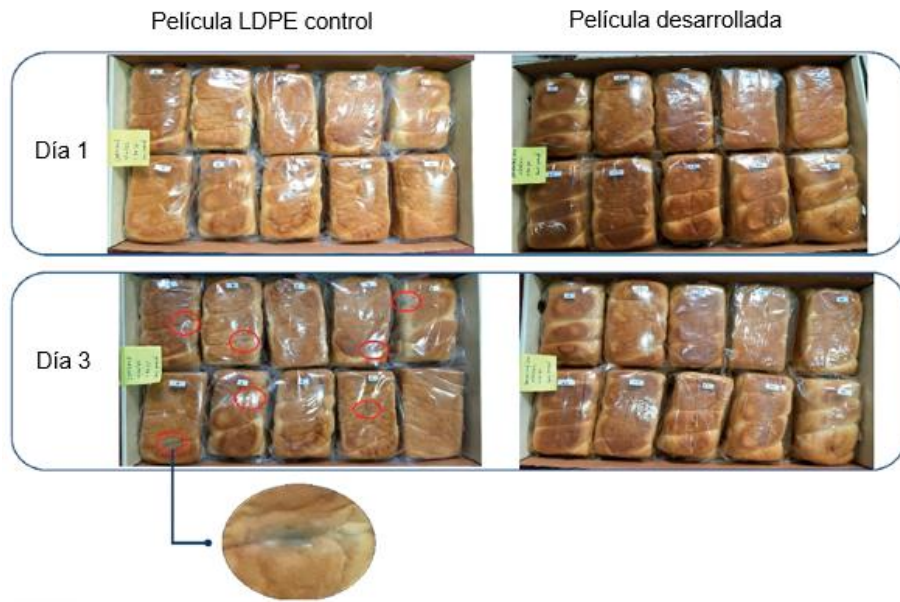


Figura 2.9 Paquetes de pan con película control y película tratada. El moho se muestra como esporas verdes y manchas borrosas en la muestra de control.

Fuente: (Pawde et al., 2023).

En otro trabajo, Giannakas y colaboradores, fabricaron películas de LDPE extruidas con nanohíbridos de carbón activado con timol para prolongar la vida útil de filetes de cerdo. Los nanohíbridos de carbón activado, se dispersaron adecuadamente en la matriz de LDPE; y su actividad antibacteriana más alta la obtuvieron a una concentración del 15% del nanohíbrido de carbón activado con timol, lo que logró alargar 2 días de vida útil a los filetes de cerdo (Giannakas et al., 2023).

2.4 Película soplada

La fabricación de películas sopladas, se producen a partir de un proceso de extrusión por soplado, el cual es ampliamente utilizado en la industria del plástico para producir películas delgadas y flexibles. Estas películas tienen aplicaciones en el embalaje de alimentos, recubrimientos para la industria agrícola y en el empaque de medicamentos. Este método se basa en la extrusión de un polímero fundido, que se sopla en forma de burbuja utilizando aire comprimido. La burbuja se expande

verticalmente mientras es enfriada, y posteriormente se pasa por rodillos para formar una película continua (Ver *Figura 2.11*).

Las variables más importantes para este proceso son: tipo de polímero y sus propiedades viscoelásticas, temperatura (temperatura extrusión y temperatura de enfriamiento de la película soplada), peso molecular de la resina, la conductividad térmica del polímero, la velocidad de extrusión, la velocidad de cristalización, la cristalinidad, calor específico del material, tipo y concentración de aditivos que se utilizan, características del tornillo y presión de inflado (Butler, 2016). Típicamente los espesores de película soplada oscilan entre 20 y 500 μm (Dae Han & O, 1975).



Figura 2.10 "Fabricación de película soplada obtenida en el CIQA"

Creación propia (Ordoñez, 2024)

El autor Fehlberg y colaboradores, utilizaron cáscara de naranja para la fabricación de películas sopladas mediante extrusión. Evaluaron la viabilidad de reemplazar hasta un 11.5 % del polietileno de baja densidad lineal con cáscara de naranja.

Los resultados muestran que estas películas son adecuadas para el envasado de alimentos, con menor resistencia mecánica, y mejorando la capacidad de bloqueo de luz visible y UV.

Estos autores, prepararon estas películas utilizando un extrusora, bajo estas condiciones Killion KLB 100, 25.4 mm del diámetro del tornillo, matriz anular de 50.8 mm, velocidad de husillo 7 RPM a 150°C (Fehlberg et al., 2023).

2.5 Propiedades antifúngicas de películas a base de LDPE

En la *Tabla 2.4*, se resumen algunas referencias donde utilizaron aceite esencial para inhibir el crecimiento de patógenos.

Tabla 2.4 "Artículos científicos donde se reportó la inhibición al crecimiento de patógenos en películas con aceites esenciales"

Título del artículo	Aceite Esencial empleado	Resumen
Un nuevo método para prolongar la vida útil del pan: bolsitas que contienen componentes de aceites esenciales (Ju et al., 2020).	Mezcla de <i>eugenol</i> y <i>citral</i> .	Los panes en tres envases diferentes (LDPE, PP y HDPE) tuvieron una vida útil total de 13, 13 y 15 días, respectivamente, mientras que los panes de control tuvieron una vida útil de 5 días. Las bolsitas que contenían aceite esencial fueron eficaces para inhibir el crecimiento de <i>Penicillium</i> y <i>Escherichia coli</i>) en medios y pan de molde sin afectar las propiedades sensoriales del pan.
Actividad Antimicrobiana <i>in vitro</i> de aceites esenciales de lavanda, menta y romero y el efecto de sus vapores en el crecimiento de <i>Penicillium spp.</i> en un sistema modelo de pan. (Valková et al., 2021)	Romero, lavanda y menta, con 40.4% cineol, 40.1% mentol y 35% acetato de linalol, respectivamente.	La actividad antifúngica más fuerte fue mostrada por el aceite esencial de menta, que inhibió totalmente el crecimiento de <i>Penicillium (P.) expansum</i> y <i>P. crustosum</i> en todas las concentraciones.
Evaluación de la composición química y la actividad antipenicillium de los vapores de aceites esenciales de <i>Abies alba</i> y dos especies de <i>Melaleuca</i> en sistemas modelo alimentarios. (Valková et al., 2022)	<i>Melaleuca armillaris subsp. Armillaris</i> , <i>Melaleuca quinquenervia</i> y <i>Abies alba</i> , con 47.5% linalol, 40.8% 1,8-cineol y 25.2% α -pineno, respectivamente.	Los aceites esenciales fueron eficaces para inhibir el crecimiento de todas las cepas de <i>Penicillium</i> (<i>expansum</i> , <i>citrinum</i> y <i>crustosum</i>) en concentraciones superiores a 125 μ L/L, mientras que se detectó un efecto inhibidor muy fuerte ($16,00 \pm 1,00$ mm) para la concentración más alta de <i>Melaleuca armillaris</i> contra <i>P. citrinum</i> .

Fuente: (Ju et al., 2020), (Valková et al., 2021) y (Valková et al., 2022).

Capítulo 3 METODOLOGÍA

3.1 Materiales y sustancias

En la elaboración de bolsas sopladas se utilizan β -ciclodextrina (BCD) (Gomas Naturales, S.A. de C.V.), aceite esencial de tomillo (TEO) (Laboratorios Hersol, de S.A. de C.V., Estado de México), Polietileno de Baja Densidad (LDPE, por sus siglas en inglés) (PEMEX Etileno, Grado PX-20020X). Todos los materiales empleados fueron de grado reactivo. La selección de estos componentes se basó en sus propiedades funcionales, las cuales favorecen la formación y el desempeño del material final.

3.2 Metodología

Para la elaboración del proyecto consta de la principalmente de tres procesos: preparación del complejo de inclusión, preparación de compuestos y finalmente la fabricación de bolsa soplada.

3.2.1 Preparación del complejo de inclusión

Para la preparación del complejo de inclusión de β -ciclodextrina con Tomillo se realizaron dos soluciones. En la primera solución, se mezclaron 0.0352 moles de BCD con 0.0868 moles de etanol al 20% y se agitaron durante 15 min. En la segunda solución, se mezclaron 0.0176 moles de TEO y 0.1232 moles de etanol con agitación constante por 15 minutos. Posteriormente, para incorporar estas dos soluciones, la primera solución se sonó en un sonicador (QSONICA SONICATORS) con una potencia de 500 W y 60% de amplitud durante 30 minutos. En los primeros 10 minutos se agregó la solución que contenía el aceite esencial (solución dos), a una velocidad de 1 mL/ min.

Posteriormente, el complejo obtenido (ICT) se secó a 60°C por 72 h en una estufa de secado (BINDER) Ver *Figura 3.1*



Figura 3.1 "Complejo de inclusión antes y después del secado"

Creación propia (Ordoñez, 2024)

3.2.2 Preparación de compuestos

Para la preparación de compuestos se utilizó un plasticorder (BRABENDER). Como polímero base se utilizó polietileno de baja densidad (LDPE, por sus siglas en inglés). Se prepararon 6 compuestos del polietileno con BCD e ICT a diferentes concentraciones (*Tabla 3.1*).

Tabla 3.1 "Nomenclatura utilizada para cada una de las muestras preparadas"

Nomenclatura	Descripción
LDPEv	100% LDPE virgen*
LDPE	100% LDPE
LDPE-BCD3	97% LDPE y 3% BCD
LDPE-ICT1	99% LDPE y 1% ICT
LDPE-ICT2	98% LDPE y 2% ICT
LDPE-ICT3	97% LDPE y 3% ICT
LDPE-ICT4	96% LDPE y 4% ICT

*No paso por cámara de mezclado, son pellets de LDPE

Creación propia (Ordoñez, 2024)

Para elaborar los compuestos, inicialmente se colocó el polietileno en la cámara de mezclado y se dejó fundir por 3 min para después agregar el aditivo correspondiente en 2 min más. La mezcla se mantuvo en agitación por 5 min más a 170° C y 60 rpm.

Los compuestos obtenidos (*Figura 3.2*), se molieron utilizando un molino de cuchillas (BRABENDER).



Figura 3.2 "Muestras después de cámara de mezclado"

Creación propia (Ordoñez, 2024)

3.2.3 Preparación de películas

Para la fabricación de las películas sopladas, se utilizó una extrusora monohusillo (BRABENDER) (*Figura. 3.3*) bajo las siguientes condiciones $T_1= 160^{\circ}\text{C}$, $T_2= 167^{\circ}\text{C}$, $T_3= 170^{\circ}\text{C}$, $T_4= 180^{\circ}\text{C}$ a 40 rpm. Inicialmente se alimentó LDPE virgen y posteriormente se incorporaron las muestras en orden ascendente.



Figura 3.3 "Fabricación de película soplada mediante extrusión por soplado"

Creación propia (Ordoñez, 2024)

Finalmente, conforme fueron saliendo las muestras se cortaron e identificaron para su caracterización posterior.

3.3 Técnicas de caracterización

3.3.1 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Técnica analítica utilizada para identificar compuestos químicos a partir de la interacción de la radiación infrarroja con la materia. Permite reconocer grupos funcionales mediante los espectros obtenidos, que actúan como una “huella digital” de las sustancias.

Se realizaron análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) utilizando un espectrómetro infrarrojo Nicolet Magna-550. Se empleó la técnica de reflectancia atenuada (ATR-FTIR) con un rango de longitud de onda de 4000 cm^{-1} hasta 400 cm^{-1}

3.3.2 Análisis Termogravimétrico (TGA)

Técnica que permite evaluar los cambios de masa de un material en función de la temperatura o el tiempo. Se estudia la estabilidad térmica, la descomposición y el contenido de componentes volátiles.

La degradación térmica se analizó en un TGA Q500 (TA Instruments, EE. UU.), el rango de temperatura de 30 a 600°C en una atmósfera de N_2 . Después de los 600°C se utilizó una atmósfera de oxígeno para favorecer la combustión completa de los compuestos orgánicos. Para calcular la pérdida de peso se utilizó el software del equipo (TA Instruments Universal Analysis 2000).

3.3.3 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Método térmico que evalúa las variaciones de energía relacionadas con las transformaciones de un material conforme cambia la temperatura. Es posible identificar procesos como la fusión, la cristalización y la transición vítrea.

Se realizaron en un DSC-Q2000 (TA Instruments, New Castle, EE. UU.) en un rango de 0°C a 300°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min; las muestras se enfriaron a 30°C a 10°C/min, seguido de un segundo de calentamiento en las mismas condiciones de la primera. El porcentaje cristalino se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_f}{(1 - \varphi)\Delta H_o}$$

Donde: ΔH_f , es el calor de fusión obtenido al segundo calentamiento, ΔH_o , es el calor de fusión del LDPE del 100% cristalino (140 J/g) (Borhani zarandi et al., 2012) y φ , es la fracción de peso de la β -ciclodextrina o del complejo de inclusión en las películas (0,0.01, 0.02, 0.03 y 0.04).

3.3.4 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Técnica que permite analizar la morfología y la estructura superficial de los materiales mediante el uso de un haz de electrones.

La morfología se observó mediante microscopía electrónica de barrido. Las muestras fueron criofracturadas, para analizar la superficie de la fractura y recubiertas con oro-paladio. Se utilizó un microscopio JEOL JCM6000. Para lograr una evaluación correcta, el aparato operaba a 15 kV. Las imágenes fueron obtenidas con un aumento de 2000 y 4000X, dependiendo del grosor de cada película.

3.3.5 Propiedades mecánicas

Describen el comportamiento de un material frente a la aplicación de fuerzas o cargas externas. Su evaluación permite determinar la capacidad del material para deformarse o fracturarse bajo diferentes condiciones.

Se analizó en una máquina universal de tensión, empleando la norma ASTM-D882-18. Se evaluaron siete probetas para cada una de las muestras, con una longitud de 127 mm. Las condiciones de prueba fueron 23°C, 45% de humedad relativa, con velocidad de 500 mm/min y una separación de mordazas de 50 mm.

3.3.6 Permeabilidad

Propiedad que describe la capacidad de un material para permitir el paso de sustancias, como gases o líquidos, a través de su estructura.

1. Método de prueba: ASTM-D-3985-17

Índice de transmisión de Oxígeno de películas y hojas plásticas usando sensor coulométrico.

2. Método de prueba: ASTM-E-398-13

Método de prueba estándar para la velocidad de transmisión de vapor de agua de materiales laminados mediante medición dinámica de humedad relativa.

Capítulo 4 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Caracterización de los complejos de inclusión

4.1.1 Análisis de Electroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier “FTIR”

En *Figura 4.1*, se muestran los espectros del aceite esencial de Tomillo (TEO), de la β -ciclodextrina (BCD) y del complejo de inclusión de tomillo (ICT). En el espectro del TEO se observan los picos característicos asociados al timol, un compuesto fenólico presente en el aceite esencial de tomillo. Este compuesto muestra bandas en las regiones de 3460 cm^{-1} estiramiento OH, la flexión de los grupos O–H en el rango $1340\text{--}1255\text{ cm}^{-1}$, las bandas de absorción del C–OH estirándose en 1155 y 1056 cm^{-1} , y las bandas fuertes a 2956 , 2927 y 2872 cm^{-1} son asignadas al estiramiento C–H asimétrico y simétrico en grupos alifáticos --CH_3 (Catauro et al., 2017). Por otra parte, el espectro de la BCD muestra las bandas características de los sacáridos, a 3400 cm^{-1} la vibración de estiramiento O–H, 2930 cm^{-1} la vibración de estiramiento C–H, a 1640 cm^{-1} la vibración de flexión O–H, y a 1155 cm^{-1} la vibración C–O (Yuan et al., 2015). El espectro del ICT muestra las mismas bandas de la BCD, lo cual sugiere el correcto acomplejamiento del aceite esencial de tomillo (Guan et al., 2024).

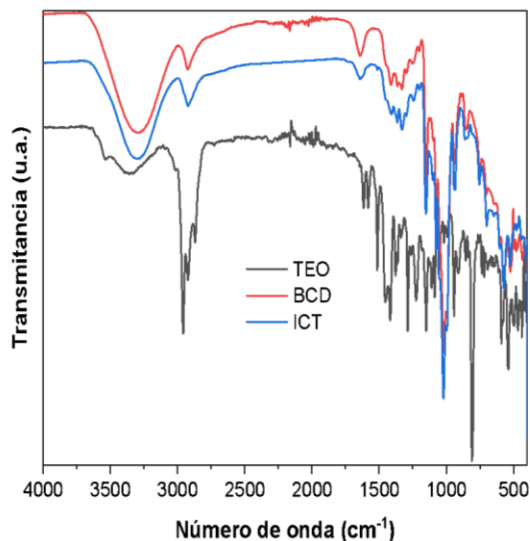


Figura 4.1 Espectros de FTIR de aceite esencial de tomillo (TEO), β -ciclodextrina (BCD) y complejo de inclusión de tomillo (ICT)

Creación propia (Ordoñez, 2024)

4.1.2 Propiedades térmicas de complejos de inclusión

Con el objetivo de conocer la estabilidad térmica del ICT se realizó un análisis termogravimétrico (TGA), además, se evaluó la energía que se absorbe o libera por calorimetría diferencial de barrido (DSC).

Análisis Termogravimétrico “TGA”

En la Figura 4.2, se muestran los espectros del TEO, BCD y el ICT. El TEO presentó una pérdida de peso de 99.8 % a 169 °C. Esta pérdida de peso es similar a la reportada por Shen que utilizó aceite esencial (Shen et al., 2024), lo cual confirma la limitante de utilizar estos materiales en procesos de extrusión debido a su baja temperatura de descomposición. Por otro lado, la BCD presentó pérdida de peso en dos etapas. La primera etapa, en el rango de 50 a 90°C, fue causada por la evaporación de las moléculas de agua (11%) (Shen et al., 2024). La segunda pérdida de peso, en un rango de 290 a 320°C, está asociada a la degradación térmica de la BCD. Este comportamiento es similar al observado por Shen, quien reportó que la BCD se degrada a 350 °C (Shen et al., 2024). El ICT también mostró pérdida de peso en dos etapas. La primera relacionada con la pérdida de agua. Sin embargo, se observa una menor pérdida 8% debido a que las moléculas de agua fueron desplazadas por el aceite esencial, lo que demuestra la formación del complejo de inclusión (del Toro-Sánchez et al., 2010). La segunda pérdida de peso en un rango de 270 a 350°C es atribuida a la descomposición de la BCD.

Esta prueba demuestra que la encapsulación del aceite esencial en un complejo de inclusión es un método adecuado para incrementar la estabilidad térmica del aceite esencial y poderlo utilizar en la elaboración de películas extruidas (Dalmolin et al., 2019).

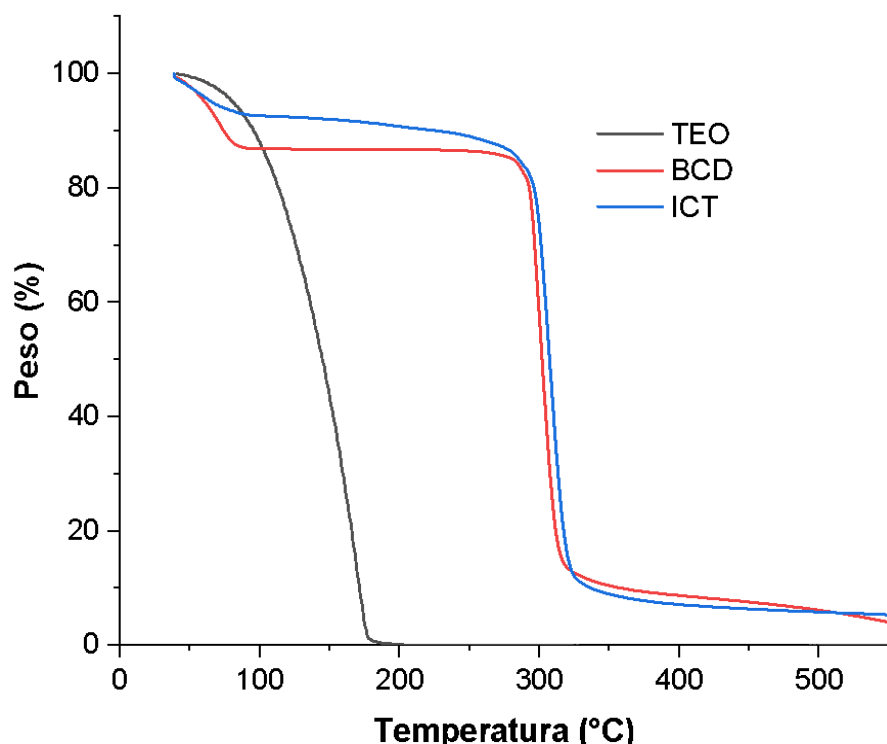


Figura 4.2 Termogramas de TGA de materiales de aceite esencial de tomillo (TEO), β -ciclodextrina (BCD) y complejo de inclusión de tomillo (ICT)

Creación propia (Ordoñez, 2024)

Análisis Calorimetría Diferencial de Barrido “DSC”

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) se considera un método indirecto para confirmar la formación de complejos de inclusión. En *Figura. 4.3*, se muestran los termogramas de BCD e ICT. La BCD presentó un pico endotérmico a 111°C, atribuido a la pérdida de agua dentro de la cavidad hidrofóbica de la β -ciclodextrina (Kringel et al., 2017). El ICT, también presentó un único pico endotérmico a 128°C. El desfase del pico endotérmico está relacionado con la presencia del aceite esencial de tomillo, que esté encapsulado en la cavidad de la β -ciclodextrina (Acosta-Ayala et al., 2024). La reducción de la intensidad o la desaparición de los picos endotérmicos indica que las interacciones entre el aceite esencial de tomillo y la β -ciclodextrina, estabilizan el sistema, disminuyendo la energía que se necesita para las transiciones térmicas (Zhang et al., 2015).

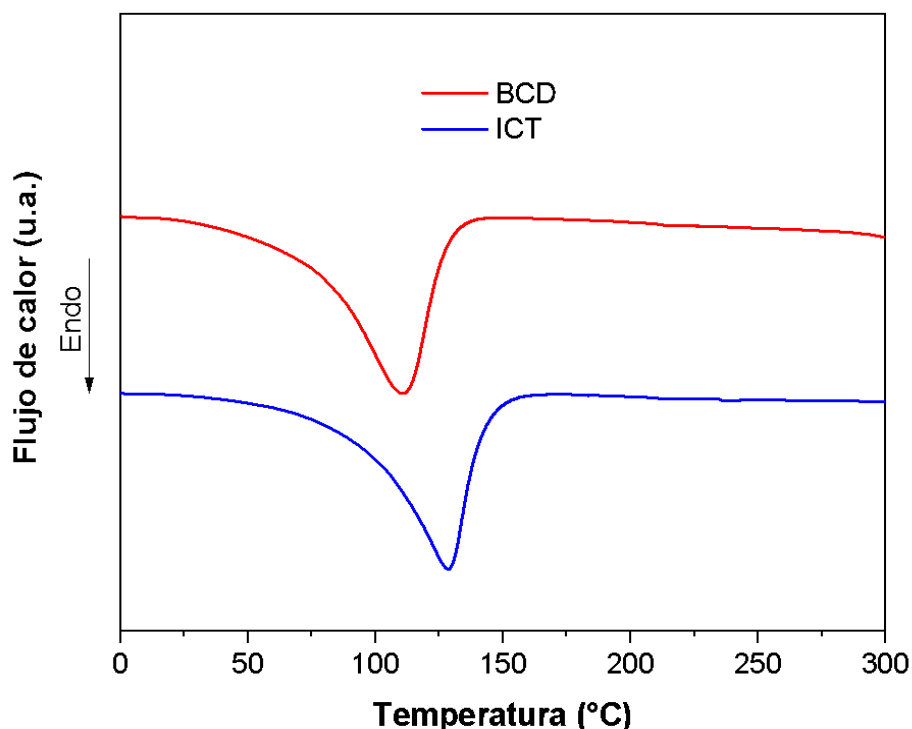


Figura 4.3 Termogramas de DSC de la β -ciclodextrina (BCD) y el complejo de inclusión de tomillo (ICT)

Creación propia (Ordoñez, 2024)

4.1.3 Análisis Microscopía Electrónica de Barrido “MEB”

La evaluación de la morfología de los complejos de inclusión se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). En *Figura 4.4*, se muestra la morfología de la BCD y el ICT. En la BCD, se observa una partícula en forma de romboide, con superficie lisa que tiene pequeñas partículas adheridas a ella. Esta morfología ya ha sido reportada anteriormente para la β -ciclodextrina (Acosta-Ayala et al., 2024). En la morfología del ICT se observaron partículas de menor tamaño. La disminución del tamaño podría atribuirse al tratamiento de ultrasonido que al mismo tiempo que propició la formación del complejo, rompió las partículas de BCD dando lugar a partículas de menor tamaño (Acosta-Ayala et al., 2024). El tratamiento por ultrasonido genera cavitación acústica en donde provocan la formación y colapso de microburbujas en el medio líquido, esto se produce en altas temperaturas facilitando la inserción del compuesto anfitrión en el huésped (Kutlu et al., 2022).

Estos compuestos presentan una cohesión más sólida y exhiben diferencias significativas en comparación con la estructura de la β -ciclodextrina (Shen et al., 2024). Estas variaciones morfológicas podrían estar vinculadas a la formación exitosa de complejos de inclusión tras el tratamiento con ultrasonido (Shen et al., 2024).

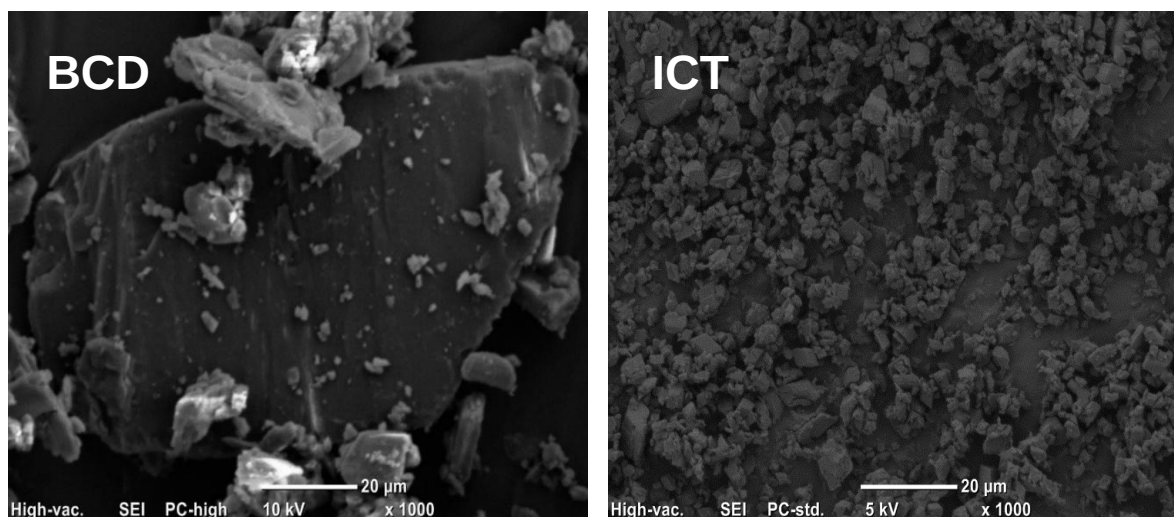


Figura 4.4 Micrografías de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de la β -ciclodextrina (BCD) y complejo de inclusión de tomillo (ICT)

Creación propia (Ordoñez, 2024)

4.2 Caracterización de películas

4.2.1 Análisis de Electroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier “FTIR”

En *Figura 4.5*, se muestran los espectros de las películas sopladas aditivadas. De acuerdo con los espectros infrarrojos se encuentran las bandas más significativas que identifican los grupos funcionales del LDPE. Los picos entre 3100 y 2600 cm^{-1} hacen referencia a hidrocarburos alifáticos C–H estiramiento, como metilo 2957 cm^{-1} y 2870 cm^{-1} y metileno 2922 cm^{-1} (Yan et al., 2015). Se muestra que los picos en todas las películas sopladas son los mismos debido a que la matriz que es el LDPE, al incluir la BCD e ICT las concentraciones que se utilizaron son bajas, por lo que no se alcanzan a ver grupos funcionales diferentes. Este mismo comportamiento se mostró en películas de LDPE adicionadas con carvacrol en β -ciclodextrina en concentraciones menores a 5% no se observaron cambios en los espectros (Shemesh et al., 2015b).

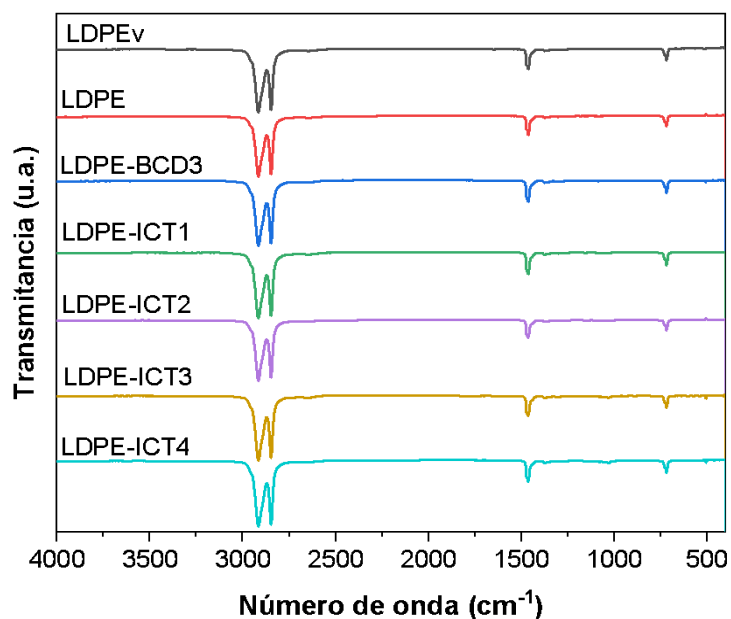


Figura 4.5 Espectros de FTIR de películas sopladas por extrusión

Creación propia (Ordoñez, 2024)

4.2.2 Análisis Termogravimétrico “TGA”

Para estudiar la estabilidad térmica de las diferentes películas sopladas y para afirmar la presencia de complejos de inclusión, se utilizó el análisis termogravimétrico, los termogramas se muestran en la *Figura 4.6*. Las películas controles (LDPEv y LDPE) solo tuvieron una etapa que ocurrió a 426°C, hace referencia a la descomposición térmica del material. En cambio, las películas que incluían BCD o IC (LDPE-BCD3, LDPE-ICT1, LDPE-ICT2, LDPE-ICT3 y LDPE-ICT4) obtuvieron dos etapas significativas. En la primera etapa, se observó una pérdida de 1 – 4 % en un rango de 308 – 317 °C, que está asociada a la descomposición térmica de BCD e ICT que se añadieron en la matriz polimérica, como informaron otros autores (Acosta-Ayala et al., 2024), los porcentajes de la pérdida de peso coinciden con el porcentaje de la adición de BCD e ICT, lo que afirma una buena dispersión y homogeneidad de aditivos en la matriz polimérica. El autor (Shemesh et al., 2015), mencionó que la segunda etapa, hace referencia a la descomposición térmica del polímero. Esta descomposición ocurrió en un rango de 409 – 448°C.

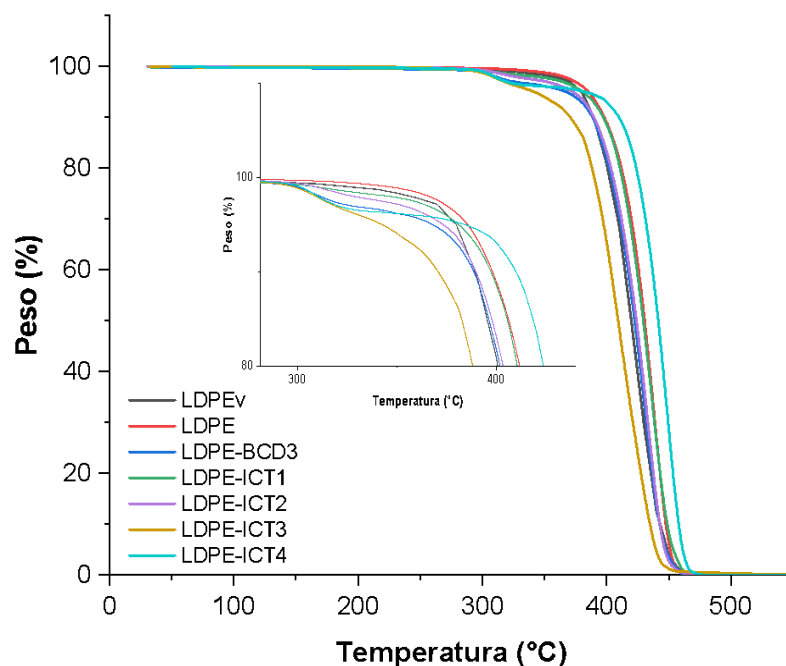


Figura 4.6 Termograma de TGA de las películas fabricadas por extrusión

Creación propia (Ordoñez, 2024)

4.2.3 Análisis Calorimetría Diferencial de Barrido “DSC”

Para estudiar las transiciones térmicas de las películas con y sin BCD e ICT, se llevaron a cabo mediante mediciones de calorimetría diferencial de barrido (DSC). En la determinación de DSC, se realizaron dos calentamientos. Se mostró el enfriamiento (*Figura. 4.7 a*) y el segundo calentamiento (*Figura. 4.7 b*) de las películas. Durante la etapa del enfriamiento, se mostró que los controles (LDPEv y LDPE), obtuvieron un pico exotérmico a 98 °C, este pico está asociado a la transición térmica del material matriz polimérico LDPE (Scoppio et al., 2022). Las películas con el BCD e ICT (LDPE-BCD3, LDPE-ICT1, LDPE-ICT2, LDPE-ICT3 y LDPE-ICT4) se observan que no tuvieron cambios y mantuvieron el pico dentro de ese rango; por lo tanto, no afectó la transición térmica. Este pico puede desplazarse ligeramente a temperaturas altas o bajas, dependiendo del grado de adición (Scoppio et al., 2022). En las películas evaluadas no se mostraron cambios debido a que las concentraciones eran menores a 5% (Kringel et al., 2017).

En el segundo calentamiento, permitió analizar las propiedades térmicas inherentes de las películas (Wu et al., 1991). Las películas controles (LDPEv y LDPE) mostraron un pico endotérmico a 110°C, este pico está asociada a la reorganización moléculas del material matriz polimérica, particularmente en materiales semicristalinos como el LDPE (Wu et al., 1991). Las películas con el BCD e ICT (LDPE-BCD3, LDPE-ICT1, LDPE-ICT2, LDPE-ICT3 y LDPE-ICT4) se mantuvieron sin cambios y mantuvieron el pico dentro del rango del 110°C. Los efectos térmicos pueden ser demasiado pequeños para no ser detectados. Este segundo calentamiento afecta la cantidad requerida para fundir o cristalizar el polímero (Kringel et al., 2017).

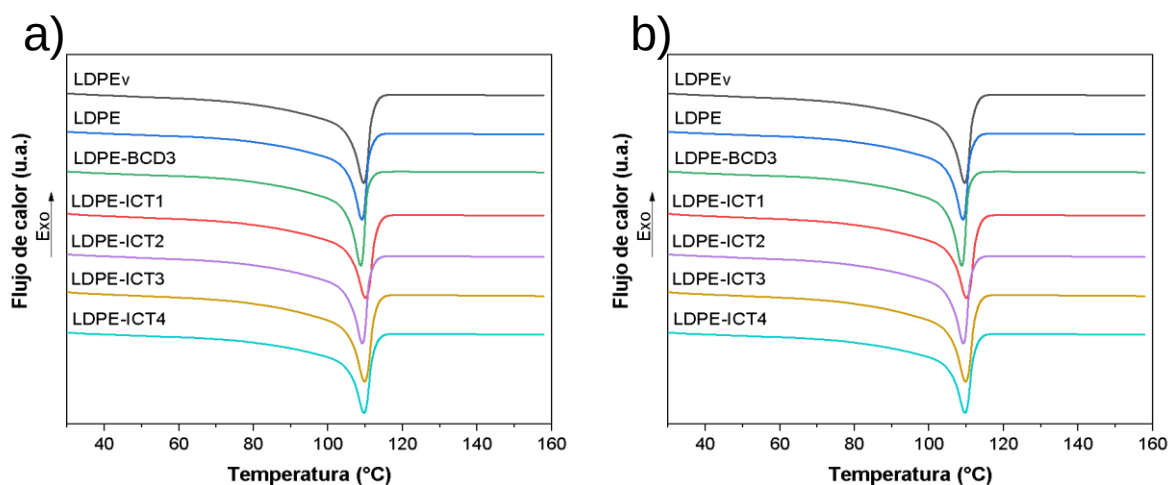


Figura 4.7 a) Termograma de enfriamiento de películas y b) Termograma del segundo calentamiento de películas

Creación propia (Ordoñez, 2024)

En la *Tabla. 4.1*, se muestra en el proceso de enfriamiento, se experimentan los cambios que dependen de su estructura cristalina y la velocidad de enfriamiento. En el segundo calentamiento, es probable que exista una disminución de la energía de fusión y cambios en las transiciones térmicas, como lo es la reorganización cristalina del material.

Tabla 4.1 "Propiedades térmicas de películas activas"

Película	ΔH_c (J/g)	T_c (°C)	ΔH_f (J/g)	T_f (°C)	X_c (%)
LDPEv	119.99	99.83	118.57	103.96	84.70
LDPE	116.02	99.66	113.58	103.90	81.13
LDPE-BCD3	108.67	99.19	104.34	104.13	76.83
LDPE-ICT1	115.02	99.48	108.97	104.08	78.62
LDPE-ICT2	108.50	99.63	103.85	103.85	75.70
LDPE-ICT3	117.47	99.48	115.88	103.93	85.33
LDPE-ICT4	107.73	99.70	115.72	104.12	86.10

Creación propia (Ordoñez, 2024)

4.2.4 Análisis MEB

Se utilizó microscopia de barrido MEB, para observar la morfología de las películas con y sin complejo de inclusión, fabricadas por método de extrusión. La *Figura 4.9*, se muestra todas las películas exhibieron una matriz con estructura adecuada y aparentemente homogénea. La película LDPEv, mostró una superficie lisa sin irregularidades. Mientras que en la película LDPE, mostró fractura irregular pero continua, podría estar relacionado a que fue sometida a una cámara de mezclado. Por otra parte, la película LDPE-BCD3 hubo presencia de agujeros y grietas en la superficie, que otros autores ya habían reportado (Acosta-Ayala et al., 2024), en la que también se observaron partículas pequeñas adheridas a la superficie. En las otras películas que incluían ICT (LDPE-ICT1, LDPE-ICT2, LDPE-ICT3 y LDPE-ICT4), mostraron pequeñas grietas y fracturas irregulares continuas. El autor (Y. Yan et al., 2022), menciona que los cambios en la morfología de los complejos de inclusión demuestran indirectamente la interacción huésped-anfitrión entre β -CD y el aceite esencial, lo que indica la formación exitosa del IC.

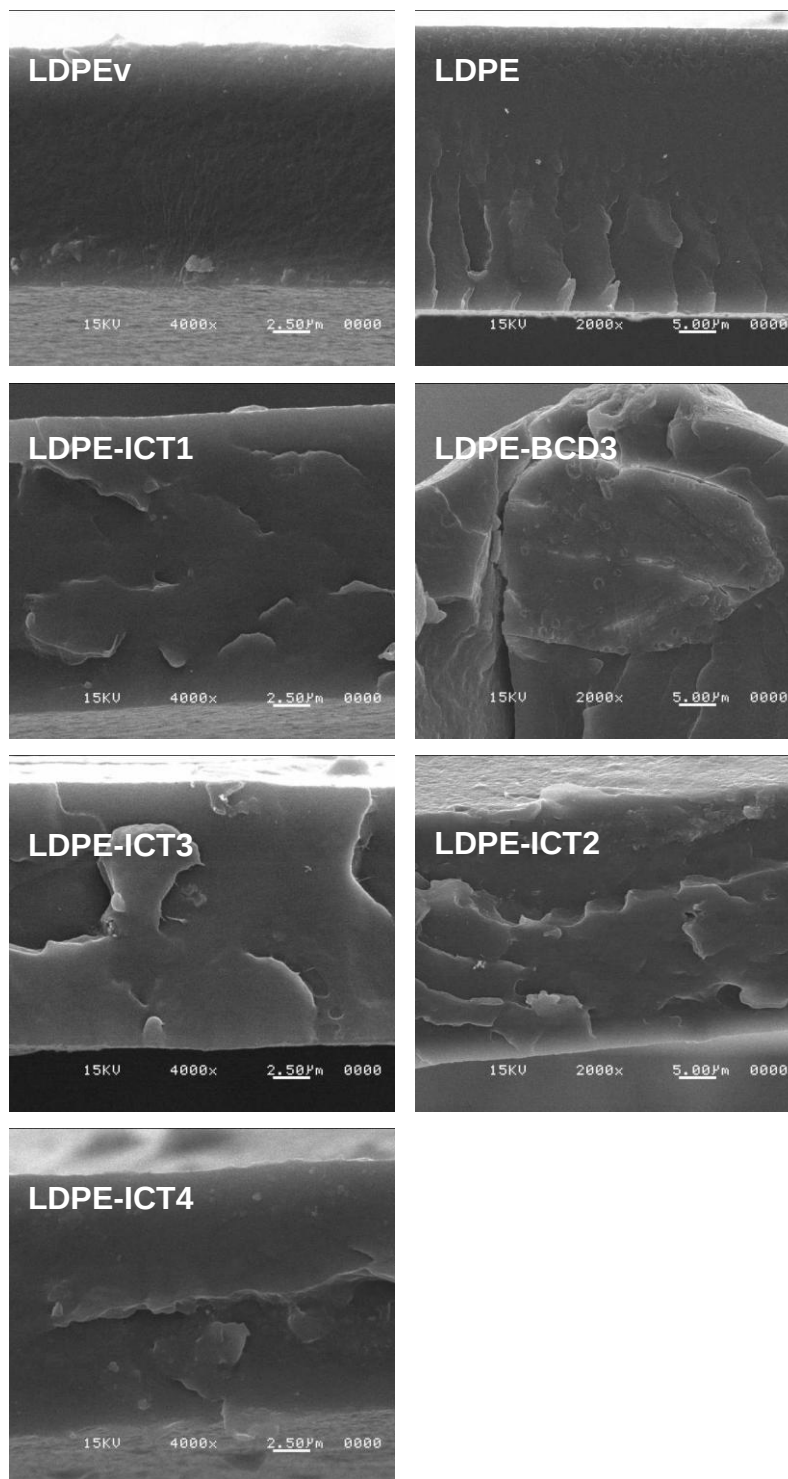


Figura 4.8 Micrografías de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de las películas a 2000X y 4000X

Creación propia (Ordoñez, 2024)

ÍNDICE

4.2.5 Análisis de propiedades mecánicas

Los empaques flexibles para alimentos deben cumplir con ciertas propiedades para transportar productos sin romperse. Se evaluó el desempeño mecánico de las películas para determinar los efectos que tienen los aditivos en la matriz polimérica del LDPE. Se compararon, módulo de Young, resistencia a la tensión y elongación de ruptura, permitieron estudiar los cambios que se producen en las películas cuando se les aplica fuerza de atracción o compresión, los resultados se muestran en la *Tabla 4.2*. Se observó que hubo cambios al adicionar BCD o ICT. La película LDPEv, indica una buena flexibilidad inicial, en cambio la película LDPE indica mayor flexibilidad respecto a la LDPEv. Mientras que la película LDPE-BCD3, indicó menor flexibilidad y sugiere mayor rigidez debido a la BCD. La película de LDPE-ICT1, mostró mejor balance entre rigidez y flexibilidad, la LDPE-ICT3 indicó menor rigidez y la LDPE-ICT4 demostró una elongación y módulo de Young equilibrada. Ver *Tabla 4.1*

Por lo tanto, las películas LDPE-ICT1 y LDPE-ICT4, mostraron un buen balance entre la resistencia, la flexibilidad y rigidez, lo que podría ser una propuesta asertiva para su aplicación en alimentos perecederos.

Tabla 4.2 "Propiedades mecánicas de películas"

Muestra	Módulo de Young (N/mm ²)	Resistencia a la Tensión (N/mm ²)	Elongación de ruptura (%)
LDPEv	4.2 ± 4.0	6.0 ± 2.5	415.53 ± 22.00
LDPE	3.0 ± 3.0	5.4 ± 1.7	411.71 ± 22.27
LDPE-BCD3	9.1 ± 7.6	3.5 ± 1.1	206.17 ± 72.57
LDPE-ICT1	7.4 ± 8.7	5.9 ± 3.1	320.99 ± 101.94
LDPE-ICT2	8.8 ± 7.0	5.1 ± 3.0	317.16 ± 104.31
LDPE-ICT3	2.2 ± 1.4	4.7 ± 2.8	206.21 ± 112.64
LDPE-ICT4	8.7 ± 6.8	6.2 ± 1.2	283.22 ± 50.72

Creación propia (Ordoñez, 2024)

4.2.6 Análisis de permeabilidad

En la *Tabla. 4.3*, se muestran los resultados de la permeabilidad de películas de LDPE, esta técnica permite seleccionar y diseñar películas sopladas con propiedades específicas para satisfacer las necesidades de cada aplicación, garantizando calidad, seguridad y eficiencia en el almacenamiento y transporte de productos. En el cual destacan los resultados de LDPE-ICT1 y LDPE-ICT4, puesto que, demostraron menor permeabilidad al oxígeno y al vapor de agua, mostrando mejor desempeño como barrera, mientras que LDPE-BCD3 aumentó la permeabilidad tanto al oxígeno como al vapor de agua, reduciendo la efectividad como barrera. El espesor influye en las propiedades de permeabilidad, con las películas más gruesas generalmente mostrando mejor capacidad de barrera.

Tabla 4.3 "Permeabilidad de películas"

Muestra	Espesor	Transmisión de Oxígeno [cm ³ / (m ² ·24 h)]	Transmisión de Vapor de Agua [g/ (m ² ·24 h)]	
			90%	100%
LDPEv	1.01 mil	10921.73	40.20	44.67
LDPE	0.99 mil	10843.57	45.03	50.04
LDPE-BCD3	1.94 mil	14352.36	64.70	71.89
LDPE-ICT1	1.56 mil	8325.54	37.00	41.11
LDPE-ICT2	1.63 mil	12140.80	33.61	37.34
LDPE-ICT3	1.36 mil	11377.32	51.53	57.25
LDPE-ICT4	2.27 mil	9416.31	28.31	31.45

Creación propia (Ordoñez, 2024)

CONCLUSIONES

Se obtuvieron exitosamente prototipos de películas de LDPE sopladas que contienen aceite esencial encapsulado en ciclodextrinas. La formación de los complejos de inclusión fue favorable de β -ciclodextrina/aceite esencial de tomillo (308 – 317 °C descomposición), permitió su procesamiento a altas temperaturas por extrusión para la fabricación de películas sopladas a base de LDPE sin afectar significativamente su procesabilidad. Al adicionar complejos de inclusión se mejoraron las propiedades térmicas y mecánicas de las películas de LDPE. Según los resultados obtenidos, los complejos de inclusión basados en aceites esenciales generaron modificaciones estructurales en matrices poliméricas.

La película LDPE-ICT4 tuvo mejor desempeño global para el empaquetado de alimentos perecederos que necesitan protección frente a la humedad y la oxidación.

La película LDPE-ICT1 también podría ser una alternativa aceptable, especialmente si se busca una película más delgada o con menor costo, aunque con propiedades de barrera ligeramente inferiores. La elección final dependerá del tipo específico de alimento y las condiciones de almacenamiento, pero LDPE-ICT4 destaca como la opción más versátil y eficiente.

TRABAJO A FUTURO

Optimizar las condiciones de extrusión por soplado para controlar el espesor de las películas sopladas.

Realizar cinéticas de liberación del aceite esencial en las películas, bajo diversas condiciones a las que se someten típicamente las películas para empaque de alimentos.

Escalar el proceso de fabricación de las películas a escala piloto controlando los parámetros del proceso.

Evaluar pruebas de inhibición en diversos hongos bajo condiciones de uso de las películas y bajo las normas estandarizadas correspondientes.

Validar pruebas de permeabilidad teniendo un control más preciso de los espesores.

Evaluar pruebas reológicas de las películas para determinar condiciones límite de procesamiento sin que se destruya el encapsulado.

BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, R. L., Rodríguez, F. J., Guarda, A., Galotto, M. J., & Bruna, J. E. (2016). Characterization of beta-cyclodextrin inclusion complexes containing an essential oil component. *Food Chemistry*, 196, 968–975. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.023>
- Acosta-Ayala, T., Sifuentes-Nieves, I., Ramírez-Vargas, E., Hernández-Gámez, J. F., Hernández-Hernández, E., & Flores-Silva, P. C. (2024). Effect of the inclusion complex formation method on the functional properties of poly (butylene adipate co-terephthalate) active films. *Food Packaging and Shelf Life*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101392>
- Almasi, H., Azizi, S., & Amjadi, S. (2020). Development and characterization of pectin films activated by nanoemulsion and Pickering emulsion stabilized marjoram (*Origanum majorana* L.) essential oil. *Food Hydrocolloids*, 99, 105338. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105338>
- Annu, Ali, A., & Ahmed, S. (2021). Eco-friendly natural extract loaded antioxidative chitosan/polyvinyl alcohol based active films for food packaging. *Heliyon*, 7(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06550>
- Ardjoum, N., Chibani, N., Shankar, S., Fadhel, Y. Ben, Djidjelli, H., & Lacroix, M. (2021). Development of antimicrobial films based on poly(lactic acid) incorporated with *Thymus vulgaris* essential oil and ethanolic extract of Mediterranean propolis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 185, 535–542. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.194>
- BBVA. (s.f.). *El impacto del desperdicio alimentario: un problema económico, social y medioambiental*. BBVA. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/el-impacto-del-desperdicio-alimentario-un-problema-economico-social-y-medioambiental>
- Borhani zarandi, M., Amrollahi Bioki, H., Mirbagheri, Z. alsadat, Tabbakh, F., & Mirjalili, G. (2012). Effect of crystallinity and irradiation on thermal properties and specific heat capacity of LDPE & LDPE/EVA. In *Applied Radiation and Isotopes* (Vol. 70, Issue 1, pp. 1–5). <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.09.001>

- Butler, T. I. (2016). Blown Film Processing. In *Handbook of Industrial Polyethylene Technology* (pp. 381–410). Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781119159797.ch12>
- Catauro, M., Bollino, F., Tranquillo, E., Sapio, L., Illiano, M., Caiafa, I., & Naviglio, S. (2017). Chemical analysis and anti-proliferative activity of Campania Thymus Vulgaris essential oil. *Journal of Essential Oil Research*, 29(6), 461–470. <https://doi.org/10.1080/10412905.2017.1351405>
- Cid-Samamed, A., Rakmai, J., Mejuto, J. C., Simal-Gandara, J., & Astray, G. (2022). Cyclodextrins inclusion complex: Preparation methods, analytical techniques and food industry applications. In *Food Chemistry* (Vol. 384). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132467>
- Dae Han, C., & O, J. Y. (1975). Studies on Blown Film Extrusion. I. Experimental Determination of Elongational Viscosity. In *JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE* (Vol. 19).
- Dalmolin, M. C., da Silva, C. E., Lunelli, C. E., Zaioncz, S., Farago, P. V., & Zawadzki, S. F. (2019). Modified β -cyclodextrin/amlodipine inclusion complexes: Preparation and application in aqueous systems. *Journal of Molecular Liquids*, 276, 531–540. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.11.116>
- del Toro-Sánchez, C. L., Ayala-Zavala, J. F., Machi, L., Santacruz, H., Villegas-Ochoa, M. A., Alvarez-Parrilla, E., & González-Aguilar, G. A. (2010). Controlled release of antifungal volatiles of thyme essential oil from β -cyclodextrin capsules. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 67(3), 431–441. <https://doi.org/10.1007/s10847-009-9726-3>
- Dobrzyńska-Mizera, M., Knitter, M., Piss, M., Szymanowska, D., Mallardo, S., Santagata, G., & Di Lorenzo, M. L. (2024). Linear low-density polyethylene modified with d-limonene/ β -cyclodextrin inclusion complex: Antimicrobial composite for active food packaging. *Polymer Engineering and Science*, 64(1), 52–61. <https://doi.org/10.1002/pen.26528>

- Doroftei, F., Pintilie, O., Rusu, M., & Lungu, M. (2024). Inclusion complexes of thyme essential oil in β -cyclodextrin: Preparation, characterization, and antimicrobial activity. *Food Hydrocolloids*, 146, 109123. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109123>
- Dong, Z., Luo, C., Guo, Y., Ahmed, I., Pavase, T. R., Lv, L., Li, Z., & Lin, H. (2019). Characterization of new active packaging based on PP/LDPE composite films containing attapulgite loaded with *Allium sativum* essence oil and its application for large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) fillets. *Food Packaging and Shelf Life*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100320>
- *Estructura de LDPE*. (n.d.).
- Fehlberg, J., McKay, S., Matuana, L. M., & Almenar, E. (2023). Use of orange juice processing waste to produce films using blown film extrusion for food packaging. *Journal of Food Engineering*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111337>
- Flores-Silva, P. C., Aguilar-Padilla, G., Sifuentes-Nieves, I., González-Morones, P., Ledezma-Pérez, A., Hernández-Hernández, E., & Ramírez-Vargas, E. (2024). Post-consumer Recycled PET Active Films Containing β -Cyclodextrins-Based Inclusion Complexes with Essential Oils: A Comparative Study between Processing Methodologies. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(7), 3000–3010. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03147-8>
- García, M. V., Bernardi, A. O., & Copetti, M. V. (2019). The fungal problem in bread production: insights of causes, consequences, and control methods. In *Current Opinion in Food Science* (Vol. 29, pp. 1–6). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.06.010>
- Giannakas, A. E., Karabagias, V. K., Moschovas, D., Leontiou, A., Karabagias, I. K., Georgopoulos, S., Karydis-Messinis, A., Zaharioudakis, K., Andritsos, N., Kehayias, G., Avgeropoulos, A., Proestos, C., & Salmas, C. E. (2023). Thymol@activated Carbon Nanohybrid for Low-Density

Polyethylene-Based Active Packaging Films for Pork Fillets' Shelf-Life Extension. *Foods*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/foods12132590>

- Gobierno de Mexico. (2022). *Gobierno de Mexico*. ÍNDICE
- Guan, Y., Zhang, J., Zhang, J., Song, W., Shi, J., Huang, X., Zhai, X., Zhang, D., Li, Z., & Zou, X. (2024b). Preparation of active film based on cinnamon essential oil into β -cyclodextrin with high hydrophobic and its preservation for griskin. *Food Control*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110344>
- Hassan, A., Ali, A., & Bachiri, E. (n.d.). *Chemical Composition and Antimicrobial Activity of Essential Oil of Thyme (Thymus vulgaris) from Eastern Morocco*. <http://www.fspublishers.org>
- Janczak, K., Bajer, K., Malinowski, R., Wedderburn, L., Kosmalka, D., & Królikowski, B. (2022). Bactericidal Properties of Low-Density Polyethylene (LDPE) Modified with Commercial Additives Used for Food Protection in the Food Industry. *Environments - MDPI*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/environments9070084>
- Jeandet, P., Sobarzo-Sánchez, E., Uddin, M. S., Bru, R., Clément, C., Jacquard, C., Nabavi, S. F., Khayat Kashani, M., Batiha, G. E. S., Khan, H., Morkunas, I., Trotta, F., Matencio, A., & Nabavi, S. M. (2021). Resveratrol and cyclodextrins, an easy alliance: Applications in nanomedicine, green chemistry and biotechnology. In *Biotechnology Advances* (Vol. 53). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107844>
- Jiang, S., Zhao, T., Wei, Y., Cao, Z., Xu, Y., Wei, J., Xu, F., Wang, H., & Shao, X. (2021). Preparation and characterization of tea tree oil/ hydroxypropyl- β -cyclodextrin inclusion complex and its application to control brown rot in peach fruit. *Food Hydrocolloids*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107037>
- Ju, J., Xie, Y., Yu, H., Guo, Y., Cheng, Y., Qian, H., & Yao, W. (2020). A novel method to prolong bread shelf life: Sachets containing essential oils components. *LWT*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109744>

- Kfoury, M., Landy, D., & Fourmentin, S. (2018). Characterization of cyclodextrin/volatile inclusion complexes: A review. In *Molecules* (Vol. 23, Issue 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules23051204>
- Krepker, M., Shemesh, R., Danin Poleg, Y., Kashi, Y., Vaxman, A., & Segal, E. (2017). Active food packaging films with synergistic antimicrobial activity. *Food Control*, 76, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.01.014>
- Kringel, D. H., Antunes, M. D., Klein, B., Crizel, R. L., Wagner, R., de Oliveira, R. P., Dias, A. R. G., & Zavareze, E. da R. (2017). Production, Characterization, and Stability of Orange or Eucalyptus Essential Oil/ β -Cyclodextrin Inclusion Complex. *Journal of Food Science*, 82(11), 2598–2605. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13923>
- Kutlu, N., Pandiselvam, R., Kamiloglu, A., Saka, I., Sruthi, N. U., Kothakota, A., Socol, C. T., & Maerescu, C. M. (2022). Impact of ultrasonication applications on color profile of foods. In *Ultrasonics Sonochemistry* (Vol. 89). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106109>
- Liu, Y., Zhang, M., Bhandari, B., & Gao, Z. (2024). Development of soy protein isolate-based active packaging films incorporating thyme essential oil and their application in preserving cherry tomatoes. *Food Hydrocolloids*, 148, 109482. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109482>
- Luis Del Río, J., Ortiz, E., Domínguez, I., Ortiz-Somovilla, V., & Cantos-Villar, E. (n.d.). *Pérdida y desperdicio de alimentos: Uno de los grandes retos de la economía circular*.
- Majid, I., Nayik, G. A., & Nanda, V. (2015). Ultrasonication and food technology: A review. *Cogent Food and Agriculture*, 1(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1071022>
- Manobanda Jiménez, G. E. (2023). Reducción de desperdicio de alimentos en la cadena de procesamiento: estrategias y beneficios. *Dominio de Las Ciencias*, 9(3), 2208–2218. <https://doi.org/10.23857/dc.v9i3.3551>

- Marques, H. M. C. (2010). A review on cyclodextrin encapsulation of essential oils and volatiles. In *Flavour and Fragrance Journal* (Vol. 25, Issue 5, pp. 313–326). <https://doi.org/10.1002/ffj.2019>
- Massad-Ivanir, N., Sand, A., Nitzan, N., Valderama, E., Kurczewski, M., Remde, H., Wegenberger, A., Shlosman, K., Shemesh, R., Störmer, A., & Segal, E. (2023). Scalable production of antimicrobial food packaging films containing essential oil-loaded halloysite nanotubes. *Food Packaging and Shelf Life*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101079>
- Pawde, S., Chaudhari, S. R., Prabhasankar, P., & Matche, R. S. (2023). LDPE-Natural Rubber Composite Film as Active Packaging: A Paradigm Shift in Oxygen Scavengers. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 15(32), 38729–38740. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c05168>
- Peixoto, E. C., Fonseca, L. M., Zavareze, E. da R., & Gandra, E. A. (2023). Antimicrobial active packaging for meat using thyme essential oil (*Thymus vulgaris*) encapsulated on zein ultrafine fibers membranes. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102778>
- Qiu, N., Li, X., & Liu, J. (2017). Application of cyclodextrins in cancer treatment. In *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry* (Vol. 89, Issues 3–4, pp. 229–246). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10847-017-0752-2>
- Qsonica. (s.f.). *Cup Horn for Q500 / Q700 Sonicators*. Qsonica. <https://www.sonicator.com/products/cup-horn-cup-for-q700-and-q500>
- Químico -Aspirante, I., Sandoval Aldana, A., Rodríguez Sandoval, E., & Ayala Aponte, A. (n.d.). *Ingeniería y Competitividad Encapsulación de Aditivos para la Industria de Alimentos*.
- Radünz, M., da Trindade, M. L. M., Camargo, T. M., Radünz, A. L., Borges, C. D., Gandra, E. A., & Helbig, E. (2019). Antimicrobial and antioxidant activity of unencapsulated and encapsulated clove (*Syzygium aromaticum*, L.) essential oil. *Food Chemistry*, 276, 180–186. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.173>

- Rahman, M. M., & Lamsal, B. P. (2021). Ultrasound-assisted extraction and modification of plant-based proteins: Impact on physicochemical, functional, and nutritional properties. In *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* (Vol. 20, Issue 2, pp. 1457–1480). Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12709>
- Scoppio, A., Cavallo, D., Müller, A. J., & Tranchida, D. (2022). Temperature modulated DSC for composition analysis of recycled polyolefin blends. *Polymer Testing*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107656>
- Shah, M. A., Bosco, S. J. D., & Mir, S. A. (2014). Plant extracts as natural antioxidants in meat and meat products. In *Meat Science* (Vol. 98, Issue 1, pp. 21–33). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.03.020>
- Shemesh, R., Krepker, M., Goldman, D., Danin-Poleg, Y., Kashi, Y., Nitzan, N., Vaxman, A., & Segal, E. (2015). Antibacterial and antifungal LDPE films for active packaging. *Polymers for Advanced Technologies*, 26(1), 110–116. <https://doi.org/10.1002/pat.3434>
- Shen, D., Chang, X., Zhou, L., Hao, D., Fang, Z., Shan, Y., Huang, L., & Li, G. (2024). Ultrasonic preparation of citral/hydroxypropyl- β -cyclodextrin inclusion complex: Application as a potential antifungal preservative in strawberry storage. *Food Control*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110046>
- Shi, C., Fang, D., Xia, S., Wang, J., Guo, Y., Lyu, L., Wu, W., & Li, W. (2023). Preparation and characterization of lemon essential oil@ β -cyclodextrin inclusion for blackberry postharvest preservation. *Food Control*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109979>
- Shi, C., Zhou, A., Fang, D., Lu, T., Wang, J., Song, Y., Lyu, L., Wu, W., Huang, C., & Li, W. (2022). Oregano essential oil/ β -cyclodextrin inclusion compound polylactic acid/polycaprolactone electrospun nanofibers for active food packaging. *Chemical Engineering Journal*, 445. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136746>
- Szejtli, J. (2004). Past, present, and future of cyclodextrin research*. In *Pure Appl. Chem* (Vol. 76, Issue 10).

- TFG- Carranza, Gonzalo. (n.d.).
- Valková, V., Ďúranová, H., Galovičová, L., Vukovic, N. L., Vukic, M., & Kačániová, M. (2021). In vitro antimicrobial activity of lavender, mint, and rosemary essential oils and the effect of their vapours on growth of penicillium spp. In a bread model system. *Molecules*, 26(13). <https://doi.org/10.3390/molecules26133859>
- Valková, V., Ďúranová, H., Vukovic, N. L., Vukic, M., Kluz, M., & Kačániová, M. (2022). Assessment of Chemical Composition and Anti-Penicillium Activity of Vapours of Essential Oils from Abies Alba and Two Melaleuca Species in Food Model Systems. *Molecules*, 27(10). <https://doi.org/10.3390/molecules27103101>
- Videira-Quintela, D., Guillén, F., Martín, O., & Montalvo, G. (2022). Antibacterial LDPE films for food packaging application filled with metal-fumed silica dual-side fillers. *Food Packaging and Shelf Life*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100772>
- Wu, X., Chen, J., & Zeng, X. (1991). The application of DSC in identification of LDPE/LLDPE blends mulching film. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 189(1), 183–193. <https://doi.org/10.1002/apmc.1991.051890117>
- Yan, G., Jing, X., Wen, H., & Xiang, S. (2015). Thermal cracking of virgin and waste plastics of PP and LDPE in a semibatch reactor under atmospheric pressure. *Energy and Fuels*, 29(4), 2289–2298. <https://doi.org/10.1021/ef502919f>
- Yan, Y., Zhao, X., Wang, C., Fang, Q., Zhong, L., & Wei, Q. (2022). Preparation, Optimization, and Characterization of Inclusion Complexes of Cinnamomum longepaniculatum Essential Oil in β -Cyclodextrin. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159513>
- Yildirim, S., Röcker, B., Pettersen, M. K., Nilsen-Nygaard, J., Ayhan, Z., Rutkaite, R., Radusin, T., Suminska, P., Marcos, B., & Coma, V. (2018). Active Packaging Applications for Food. In *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* (Vol. 17, Issue 1, pp. 165–199). Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12322>

- Yuan, C., Liu, B., & Liu, H. (2015). Characterization of hydroxypropyl- β -cyclodextrins with different substitution patterns via FTIR, GC-MS, and TG-DTA. *Carbohydrate Polymers*, 118, 36–40. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.10.070>
- Zhang, W., Li, X., Yu, T., Yuan, L., Rao, G., Li, D., & Mu, C. (2015). Preparation, physicochemical characterization and release behavior of the inclusion complex of trans-anethole and β -cyclodextrin. *Food Research International*, 74, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.04.029>