

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



PELÍCULAS BIOBASADAS EN ALMIDÓN MODIFICADO Y MICROCELULOSA  
DERIVADOS DE FUENTES BOTÁNICAS DEL SEMIDESIERTO MEXICANO  
COMO POSIBLE ALTERNATIVA FRENTE A MATERIALES POLIMÉRICOS  
SINTÉTICOS EN EL ENVASADO DE ALIMENTOS

Tesis

Que presenta ALEXIA DOMÍNGUEZ VILLARREAL  
como requisito parcial para obtener el Grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN DESARROLLO E INNOVACIÓN DE  
PROCESOS BIOTECNOLÓGICOS

Saltillo, Coahuila

Noviembre 2025

PELÍCULAS BIOBASADAS EN ALMIDÓN MODIFICADO Y MICROFIBRA  
DERIVADOS DE FUENTES BOTÁNICAS DEL SEMIDESIERTO MEXICANO  
COMO POSIBLE ALTERNATIVA FRENTE A MATERIALES POLIMÉRICOS  
SINTÉTICOS EN EL ENVASADO DE ALIMENTOS

Tesis

Elaborada por ALEXIA DOMÍNGUEZ VILLARREAL como requisito parcial para  
obtener el Grado de Maestro en Ciencias en Desarrollo e Innovación de  
Procesos Biotecnológicos con la supervisión y aprobación del Comité de

Asesoría

Dr. Francisco Hernández Centeno

Director de Tesis

Dra. María Hernández González

Asesor

Dra. Haydeé Yajaira López De la Peña

Asesor

Dr. Juan Manuel Tirado Gallegos

Asesor

Dr. Antonio Flores Naveda

Subdirector de Postgrado UAAAN

Saltillo, Coahuila

Noviembre 2025

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a **Dios**, quien es mi fortaleza en todo momento, dándome las herramientas necesarias para continuar cuando el camino parecía complicado y mostrándome siempre que no hay obstáculo imposible cuando se camina con fe.

A mis asesores, **Dr. Francisco Hernández Centeno, Dra. María Hernández González, Dra. Haydeé Yajaira López De la Peña, Dra. Dolores Gabriela Martínez Vázquez Dr. Juan Manuel Tirado Gallegos**, gracias por su paciencia, sus consejos y la pasión con la que transmiten sus conocimientos. Su guía no solo fue fundamental para el desarrollo de esta investigación, sino también para mi crecimiento académico y personal. Gracias por inspirarme con su ejemplo y por creer en este proyecto.

**A mi familia**, no tengo palabras suficientes para agradecerles. Ustedes son mi sostén y mi mayor bendición. Gracias por el apoyo incondicional, por comprenderme en todo momento, por motivarme, por darme la fuerza para continuar y creer en mí. Cada logro mío es también de ustedes.

A la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación** por el apoyo económico otorgado a través de la beca correspondiente.

A la Dra. Claudia Alejandra Rodríguez González del Instituto de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, por las imágenes de SEM.

A la Dra. Claudia Magdalena López Badillo de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila, por facilitar el estudio de DRX.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron en este proceso: desde quienes me ofrecieron un consejo hasta los que me otorgaron un gesto de confianza. Este trabajo es el resultado de un esfuerzo colectivo, y en cada página se refleja un pedacito del amor y del apoyo recibido, muchas gracias.

## DEDICATORIAS

Dedico este esfuerzo primeramente a **Dios**, por la vida, la salud y la oportunidad de soñar. Por ser guía en los momentos de incertidumbre, consuelo en los días difíciles y luz en cada decisión tomada.

Con el corazón lleno de gratitud, dedico este trabajo a las personas más importantes en mi vida.

A mi familia, por ser mi raíz, mi refugio y mi motor. A mis padres, **Lorena Villarreal y Heber Domínguez** que, con su amor incondicional, su esfuerzo y sus enseñanzas me mostraron que la perseverancia siempre abre camino; gracias por ser ejemplo de fortaleza y entrega, y por darme las herramientas necesarias para llegar hasta aquí.

A mi hermana, **Lorena Domínguez** que con su apoyo y compañía supo recordarme que nunca estoy sola y que cada paso que doy es un logro compartido.

Finalmente, dedico este trabajo a todos aquellos que, con pequeños gestos de apoyo, me mostraron la grandeza de la amistad y la importancia de creer en mí misma.

Esta dedicatoria es un tributo a cada mirada de confianza, a cada abrazo y a cada palabra de aliento que impulsó a seguir adelante.

## INDICE GENERAL

LISTA DE CUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
HIPÓTESIS .....	2
OBJETIVOS .....	2
General .....	2
Específicos.....	2
I.    REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
1.1.    El uso de plásticos derivados del petróleo su problemática .....	4
1.2.    Problemática de los plásticos en el envasado de alimentos.....	6
1.3.    Alternativas al uso de plásticos derivados del petróleo .....	7
1.4.    Biopolímeros .....	8
1.4.1.    Quitano.....	9
1.4.2.    Almidón .....	10
1.4.3.    Proteínas.....	10
1.4.4.    Fibras .....	11
1.4.5.    Polihidroxicanoatos (PHA's).....	12
1.5.    Ventajas del uso de biopolímeros como sustituto de los plásticos .....	12
1.6.    Desventajas del uso de biopolímeros como sustituto de los plásticos	13
1.7.    Propiedades físicas para considerar en la confección de las películas biobasadas.....	14
1.7.1.    Propiedades mecánicas.....	14
1.7.2.    Propiedades estructurales .....	16
1.7.3.    Estabilidad frente a la humedad (solubilidad).....	19
1.7.4.    Propiedades ópticas .....	19
1.7.5.    Propiedades de barrera .....	20

4.5.7.	Biodegradabilidad de los polímeros biobasado .....	21
4.6.	Aplicaciones de los polímeros biobasados .....	23
II.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	24
2.1.	Obtención del almidón .....	24
2.2.	Acetilación del almidón nativo obtenido .....	25
2.2.1.	Determinación de grados de sustitución (GS) y % de grupos acetilo (%GA) .....	25
2.3.	Formulación de películas .....	26
2.4.	Determinación de grosor .....	28
2.5.	Determinación de opacidad .....	28
2.6.	Determinación de solubilidad .....	29
2.7.	Determinación químico-estructural de las películas por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR/ATR) .....	29
2.7.1.	Determinación de índice de cristalinidad aparente .....	29
2.7.2.	Determinación del índice de afinidad al agua .....	30
2.8.	Evaluación de las propiedades mecánicas y de permeabilidad al vapor de agua (PVA) .....	30
2.9.	Difracción de rayos X (DRX) .....	31
2.10.	Morfología de superficie de película por SEM .....	31
2.11.	Análisis estadístico .....	32
III.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	33
3.1.	Obtención de almidón nativo de raíz de calabacilla loca y microfibras de lechuguilla .....	33
3.2.	Acetilación del almidón nativo .....	33
3.2.1.	Grados de sustitución (GS) y Porcentaje de acetilación (%GA) .....	35
3.3.	Formulación de películas .....	36
3.4.	Caracterización morfológica por SEM .....	37
3.5.	Propiedades ópticas .....	41
3.5.1.	Luminosidad .....	41
3.5.2.	Índice de amarillamiento (YI) .....	42
3.5.3.	Opacidad .....	43

3.6.	Grosor .....	45
3.7.	Solubilidad.....	46
3.8.	Caracterización por FTIR/ATR.....	48
3.8.1.	Índice de cristalinidad aparente .....	53
3.8.2.	Índice de afinidad al agua .....	55
3.9.	Difracción de rayos X.....	56
3.10.	Propiedades mecánicas .....	60
3.10.1.	Tensión a la fractura (TF).....	60
3.10.2.	Porcentaje de elongación (%E).....	62
3.11.	Permeabilidad al vapor de agua (PVA) .....	63
IV.	CONCLUSIONES .....	66
	REFERENCIAS .....	69

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos de formulación de soluciones filmogénicas. ....	27
Cuadro 2. Grados de sustitución y porcentaje de grupos acetilo de almidones de raíz de calabacilla loca acetilados por el método Trela (2018) / Xu, Miladinov & Hanna (2004).....	35

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción estimada de plásticos en los últimos 70 años.....	4
Figura 2. Clasificación de los materiales biopoliméricos según su origen y método de producción.....	9
Figura 3. Representación esquemática del ensayo mecánico.....	16
Figura 4. Modelos esquemáticos del estado amorfo (a) y cristalino (b).....	18
Figura 5. Procedimiento general para la obtención de almidón por vía húmeda a partir de raíces de calabacilla loca ( <i>C. foetidissima</i> Kunth).....	24
Figura 6. Espectrogramas de almidón nativo y acetilado de calabacilla loca acotados al intervalo de no. de onda de 1170 a 1770 $\text{cm}^{-1}$ .....	33
Figura 7. Espectrogramas de almidón nativo y acetilado de calabacilla loca acotada al intervalo de no. onda de 2970 a 3670 $\text{cm}^{-1}$ . ....	34
Figura 8. Película obtenida a partir de almidón modificado y 0.25% de microfibra de lechuguilla ( <i>A. lechuguilla</i> Torr.). Obtenida sobre un fondo de placa de acero inoxidable.....	36
Figura 9. Micrografías de películas en orden % de concentración de microfibra de lechuguilla con almidón nativo de raíz de calabacilla loca, obtenidas mediante SEM a 510 X.....	39
Figura 10. Micrografías de películas en orden % de concentración de microfibra de lechuguilla con almidón acetilado de raíz de calabacilla loca, obtenidas mediante SEM a 510 X.....	40
Figura 11. Luminosidad ( $L^*$ ) de las películas-almidón nativo y películas-almidón modificado obtenidas.....	42
Figura 12. Índice de amarillamiento (YI) de las películas-almidón nativo y películas-almidón modificado obtenidas. ....	43
Figura 13. Opacidad de las películas-almidón nativo y películas-almidón modificado obtenidas.....	44
Figura 14. Grosor de las películas-almidón nativo y películas-almidón modificado obtenidas.....	45

Figura 15. Solubilidad de las películas-almidón nativo y películas-almidón modificado obtenidas.....	47
Figura 16. Espectrograma IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde se utilizó almidón de calabacilla loca nativo, acotado a las bandas entre 3000 y 3700 $\text{cm}^{-1}$ .....	49
Figura 17. Espectrograma IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde se utilizó almidón de calabacilla loca acetilado, acotado a las bandas entre 3000 y 3700 $\text{cm}^{-1}$ .....	49
Figura 18. Espectrograma IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde se utilizó almidón de calabacilla loca nativo, acotado a las bandas entre 1170 y 1800 $\text{cm}^{-1}$ .....	50
Figura 19. Espectrograma IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde se utilizó almidón de calabacilla loca acetilado, acotado a las bandas entre 1170 y 1800 $\text{cm}^{-1}$ .....	50
Figura 20. Espectrograma IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde se utilizó almidón de calabacilla loca nativo, acotado a las bandas entre 900 y 1170 $\text{cm}^{-1}$ .....	52
Figura 21. Espectrograma IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde se utilizó almidón de calabacilla loca acetilado, acotado a las bandas entre 900 y 1170 $\text{cm}^{-1}$ .....	52
Figura 22. Valores de índice de cristalinidad aparente de las películas obtenidas.....	53
Figura 23. Valores de índice de afinidad al agua de las películas obtenidas....	55
Figura 24. Difractogramas de rayos X de tratamientos donde se utilizó almidón nativo y acetilado en la formulación de películas.....	57
Figura 25. Cristalinidad aparente (%) obtenida a partir de los difractogramas de rayos X de las películas elaboradas.....	59
Figura 26. Tensión a la Fractura (TF) de las películas obtenidas.....	61
Figura 27. Porcentaje de Elongación (E%) de las películas obtenidas.....	62
Figura 28. Permeabilidad al vapor del agua (PVA) de las películas obtenidas.....	64

## RESUMEN

PELÍCULAS BIOBASADAS EN ALMIDÓN MODIFICADO Y MICROCELULOSA  
DERIVADOS DE FUENTES BOTÁNICAS DEL SEMIDESIERTO MEXICANO  
COMO POSIBLE ALTERNATIVA FRENTE A MATERIALES POLIMÉRICOS  
SINTÉTICOS EN EL ENVASADO DE ALIMENTOS

Por

ALEXIA DOMÍNGUEZ VILLARREAL  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN DESARROLLO E INNOVACIÓN DE  
PROCESOS BIOTECNOLÓGICOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DR. FRANCISCO HERNÁNDEZ CENTENO-ASESOR

Saltillo, Coahuila

Octubre 2025

## RESUMEN

El uso desmedido de plásticos de origen petroquímico y la fuerte dependencia hacia estos materiales representan una problemática ambiental que se ha extendido prácticamente a nivel global, en gran parte debido a su mínima capacidad de degradación biológica. Formular, obtener y caracterizar materiales biobasados a partir de componentes modificados por acetilación de dos fuentes botánicas no convencionales del semidesierto mexicano, es una opción para ayudar a paliar este problema. Se elaboraron películas utilizando microfibras de lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.) y almidón nativo y modificado aislado de raíces de *C. foetidissima* Kunth. Resultaron 16 tratamientos por triplicado. Se determinaron sus propiedades físicas (ópticas y mecánicas), químico-estructurales y de barrera. Se identificó que las biopelículas formuladas a partir de almidón modificado (PAA) presentan un índice de amarillamiento más alto y una luminosidad menor en relación a las biopelículas de almidón nativo (PAN), estas últimas presentaron tendencia a ser más gruesas, por la adición de microfibras. Las PAA cuentan con mejores propiedades mecánicas respecto a las PAN (mayor % elongación y menor en tensión a la fractura), pero fueron más solubles con resultados mixtos en la PVA, atribuible esto al uso de almidón acetilado. Se acepta la hipótesis nula planteada ya que las PAA presentaron en general propiedades físicas, mecánicas y de permeabilidad más convenientes que las de las PAN.

**Palabras clave:** biopolímeros, *Cucurbita foetidissima*, acetilación, % elongación, DRX, FTIR/ATR.

## **ABSTRACT**

BIOBASED FILMS BASED ON MODIFIED STARCH AND MICROCELLULOSE  
DERIVED FROM BOTANICAL SOURCES FROM THE MEXICAN SEMI-  
DESERT AS A POSSIBLE ALTERNATIVE TO SYNTHETIC POLYMERIC  
MATERIALS IN FOOD PACKAGING

By

ALEXIA DOMÍNGUEZ VILLARREAL  
MASTER OF SCIENCE IN BIOTECHNOLOGICAL PROCESS DEVELOPMENT  
AND INNOVATION

ANTONIO NARRO AUTONOMOUS AGRARIAN UNIVERSITY  
DR. FRANCISCO HERNÁNDEZ CENTENO - ADVISOR

Saltillo, Coahuila,

Octubre 2025

## ABSTRACT

Environmental effect produced by the indiscriminate use of petroleum-derived plastic materials and the widespread dependence on these materials is a problem that has reached almost every corner of our planet due to their extremely slow biodegradability. Formulating, obtaining, and characterizing biobased materials from acetylation-modified components of two unconventional botanical sources from the Mexican semi-desert is an option to help alleviate this problem. Films were created using microfibers from lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.) and native and modified starch isolated from *C. foetidissima* Kunth roots. Sixteen triplicate treatments were performed. Their physical (optical and mechanical), chemical-structural, and barrier properties were determined. It was observed that modified starch films (MSF) exhibit a higher yellowing index and lower luminosity compared to native starch films (NSF); the latter tended to be thicker due to microfibers addition. PAAs exhibited better mechanical properties than PANs (higher elongation % and lower fracture tensile strength), but were more soluble, with mixed results in PVA, attributable to the use of acetylated starch. The null hypothesis is accepted since PAAs generally exhibited better physical, mechanical, and permeability properties than PANs.

**Keywords:** *biopolymers, Cucurbita foetidissima, acetylation, % elongation, XRD, FTIR/ATR*

## INTRODUCCIÓN

El uso indiscriminado de materiales plásticos procedentes de recursos petrolíferos ha generado consecuencias ambientales que repercuten de manera significativa en el planeta y en la sociedad, como resultado de su prolongado tiempo de descomposición biológica. La industria de los alimentos no está exenta de este panorama, puesto que la mayoría de los empaques que utiliza provienen de compuestos petroquímicos, cuyo fin principal es mantener las cualidades de los productos desde la etapa de cosecha hasta su procesamiento final.

No han sido poco los esfuerzos que se han realizado en los últimos años para intentar disminuir la problemática, lo que ha estimulado el avance de compuestos elaborados a partir de recursos naturales y renovables, intentando obtener un producto lo más parecido a los plásticos, pero hasta el momento no se ha logrado poder conservar las características mecánicas y de barrera que presentan los polímeros sintéticos.

Es por ello la importancia de continuar desarrollando materiales a base de formulaciones y adaptaciones de dichos materiales de origen natural. Por ello en el este trabajo se trabajará con dos materias primas: la celulosa y el almidón, con el fin desarrollar de un material compuesto de origen biológico (biocomposito), con la premisa que sea útil para diversas aplicaciones industriales y comerciales. Diversos materiales de origen natural han sido utilizados para la elaboración de polímeros plásticos de origen biológico, provenientes de fuentes animales, vegetales, micóticas e incluso el reino monera, incluyendo compuestos tales como seda, quitosano, celulosa, proteínas, y almidón. Entre ellos, el almidón destaca por ser el más abundante en la naturaleza y por su elevado potencial para el desarrollo de nuevos materiales plásticos.

Dentro de estas materias primas de biopolímeros, las raíces pertenecientes a la calabacilla loca (*Curcubita foetidissima Kunth*) y las fibras provenientes de lechuguilla (*Agave lechuguilla Torr.*) son dos materiales que se podrían utilizar para formular materiales biobasados que pudieran ser sustentables. Se hace necesario examinar estos materiales plásticos de origen natural para examinar sus usos potenciales basadas en sus propiedades.

## HIPÓTESIS

**H<sub>0</sub>:** Materiales biobasados con al menos un componente modificado mediante acetilación resultan con mejores propiedades respecto a aquellos formulados con componentes nativos.

**H<sub>a</sub>:** La modificación de un componente por acetilación no muestra efectos en las propiedades de las películas biobasadas, comparadas con aquellas formuladas con componentes nativos.

## OBJETIVOS

### General

Formular, desarrollar y caracterizar materiales biobasados a partir de polisacáridos de dos fuentes botánicas no convencionales del semidesierto mexicano, modificando al menos uno mediante acetilación, para proponerlo como un material útil en el envasado y transporte de alimentos.

### Específicos

1. Obtener almidón y microfibras nativos a partir de fuentes botánicas del semidesierto mexicano: raíces pertenecientes a calabacilla loca (*Cucurbita foetidissima* Kunth) y las fibras derivadas de lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.).
2. Modificar el almidón nativo obtenido por medio de reacción de acetilación.
3. Formular soluciones filmogénicas con diferentes proporciones de almidón nativo y acetilado, microfibras y obtener las películas correspondientes.
4. Caracterizar las películas obtenidas en cuanto a propiedades físicas (humedad, solubilidad, grosor), ópticas (color, índice de amarillamiento, opacidad), mecánicas (% de elongación, módulo de elasticidad, tensión a la fractura), permeabilidad al vapor de agua y microestructura (SEM).

5. Caracterizar las películas obtenidas en cuanto a propiedades moleculares y químico – estructurales por metodologías de: difracción de rayos X (DRX) y FTIR/ATR.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### 1.1. El uso de plásticos derivados del petróleo su problemática

A partir del comienzo del siglo XX, la industria del plástico ha desarrollado numerosos plásticos sintéticos de origen petroquímico, los cuales destacan por sus características favorables y su bajo costo de producción. Sin embargo, debido al incremento exorbitante de su producción en las últimas 7 décadas (Fig. 1) y el que sean productos de un solo uso, se ha reflejado en una gran problemática debido a sus efectos nocivos sobre el ambiente. La contaminación proveniente por las películas plásticas en los ecosistemas marinos y terrestres se reduciría si estas fueran biodegradables. Por esta razón, diversos países han emprendido la búsqueda de alternativas que puedan sustituir a los materiales plásticos. (Parra Joselyne, 2019).

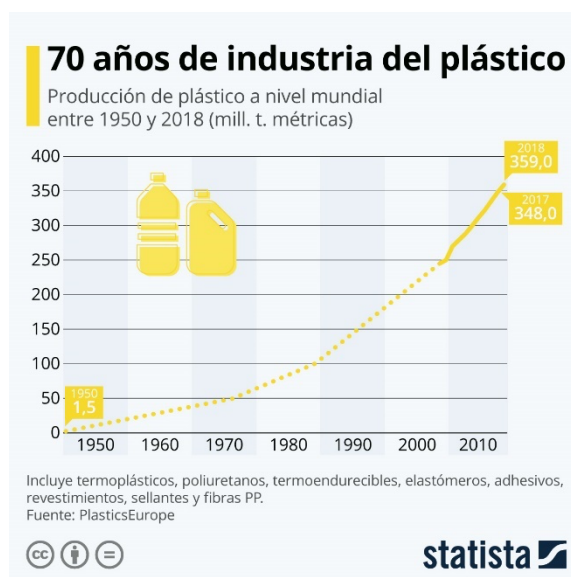


Figura 1. Producción estimada de plásticos en los últimos 70 años. Fuente: <https://es.statista.com/grafico/20441/produccion-de-plastico-a-nivel-mundial/>

Los plásticos provenientes de la industria petroquímica, sintéticos y no biodegradables, se han empleado desde la década de 1940. Según la Environmental Protection Agency (EPA), en 2009 Estados Unidos produjo

aproximadamente 13 MM de toneladas de plásticos destinados a envases y embalajes, casi 11 MM de toneladas en productos de uso prolongado y alrededor de 7 MM de toneladas en artículos de corta vida útil, como tazas y platos. En los países con economías desarrolladas, el aprovechamiento de estos materiales es significativamente mayor, lo que evidencia su carácter indispensable en la actualidad. (United State Environmental Protection Agency, 2010).

El impacto contaminante en los océanos ocasionado principalmente a causa de los materiales plásticos y sus productos derivados petroquímicos es resultado de la acción humana, manifestándose a través de la negligencia, falta de atención y la insuficiente conciencia ambiental sobre la magnitud de los problemas asociados al uso indiscriminado de estos materiales. Según Hirai y Takada (2011), citados por Luque González (2019), gran parte de los plásticos responsables de la contaminación de los océanos proviene de fuentes terrestres: “Los océanos se están convirtiendo en el vertedero del plástico que inunda la sociedad actual, de cualquier país del mundo. Unos 8 millones de toneladas de plástico entran en nuestros océanos cada año, y ya sea en forma de microesferas o de envases de plástico, la ciencia demuestra que se están incorporando a la cadena trófica.” (Luque González, 2019).

El plástico constituye un material resistente a la degradación tanto terrestre como marina, con un periodo de descomposición estimado entre 150 y 1000 años. Globalmente, se generan alrededor de 280 MM de toneladas de desechos plásticos al año. Entre 2010 y 2013, se localizaron cinco acumulaciones flotantes de plástico, conocidas como islas, que afectan y contaminan amplias zonas costeras y marítimas. (Shareyko, 2011).

El almacenamiento de residuos de lenta degradación en rellenos sanitarios ha incentivado la búsqueda global de fuentes renovables como una opción para la producción de polímeros biodegradables. Considerando que los envases para alimentos representan una parte importante del uso de plásticos convencionales, resulta fundamental explorar opciones que sean respetuosas con el medio ambiente. (Navia, Ayala and Villada, 2012).

## 1.2. Problemática de los plásticos en el envasado de alimentos

Por su importancia en las diversas cadenas de valor, el sector de envases y embalajes se considera uno de los más activos y dinámicos a nivel mundial. Los plásticos, son materiales de embalaje más empleados para el envasado de alimentos debido a que son económicos, bastantes fáciles de moldear, bajo peso, entre otras propiedades; sin embargo, los plásticos son derivados del petróleo lo que aumenta la huella de carbono, los materiales no biodegradables no son sostenibles y contribuyen a la contaminación ambiental. Ante el aumento preocupante por el efecto ambiental ocasionado por desechos plásticos, la industria alimentaria dirige su atención al desarrollo de materiales biodegradables y sostenibles que puedan cumplir con las expectativas de los consumidores (Nair, *et al.* 2023).

### Ventajas

Los plásticos cuentan con cualidades versátiles, entre ellas su durabilidad y resistencia, estos productos son esenciales para todo tipo de industria y han sustituido el vidrio, metal y papel como opciones de envasado (García *et al.*, 2012).

La función principal de los envases consiste en la conservación y protección de diversos productos, destacando los alimentos y materias primas como los de mayor relevancia. Esta protección se logra mediante envases fabricados, en su mayoría, formulados con base en polímeros sintéticos. Sin embargo, el empleo indiscriminado de estos materiales ha provocado graves impactos ecológicos, favoreciendo la contaminación generada por residuos sólidos de lenta degradación, lo que ha motivado la búsqueda de polímeros de origen natural.(Villada, Acosta and Velasco, 2007).

Los plásticos son ampliamente utilizados debido a su bajo costo, ligereza, resistencia a la oxidación, estabilidad frente a agentes atmosféricos, versatilidad, propiedades como aislante eléctrico y su capacidad para reemplazar materiales como el vidrio o el metal.(Soto Velásquez *et al.*, 2023).

El consumo de materiales plásticos ha aumentado de 5 MM de toneladas en el año de 1950 a 200 millones en 2012 aproximadamente. Al ser resistentes a la degradación y su uso excesivo se generan desechos que pueden llegar a acumularse en el ambiente, esto ocasiona graves problemas ambientales. Se ha intentado disminuir la problemática a través de procesos de incineración, reciclaje, foto degradación o re-uso, estas alternativas no se consideran 100% efectivas por lo cual presentan ciertas desventajas (García *et al.*, 2012).

Su elevada capacidad de soportar la corrosión, la humedad y a la degradación por microorganismos convierte a los plásticos en desechos de difícil eliminación, constituyendo así un importante problema ambiental. Por ejemplo, los polímeros de polietileno y polipropileno, presentes en bolsas plásticas, podrían requerir 500 años para su descomposición.(Soto Velásquez *et al.*, 2023).

### **1.3. Alternativas al uso de plásticos derivados del petróleo**

La creciente preocupación por los elevados niveles de contaminación asociados a la gestión inadecuada de materiales plásticos tradicionales no degradables ha impulsado el desarrollo de materiales de origen biológico, conocidos como biopolímeros, los cuales cuentan propiedades más amigables con el medio ambiente. (Sarango, 2022), los cuales se han presentado como una solución a la problemática (García *et al.*, 2012).

La industria ha cambiado el enfoque hacia la producción de materiales biodegradables debido a la demanda del consumidor, esto con la intención de reducir el material sintético, mayor sostenibilidad, biodegradabilidad, respetuosos con el medio ambiente, económico, de baja densidad, etc. (Hernández-Centeno *et al.*, 2020).

Es fundamental que estos materiales, además de ser biodegradables, posean propiedades mecánicas adecuadas para su uso (Carrero, 2019).

#### 1.4. Biopolímeros

Los biopolímeros, conocidos igualmente como polímeros de origen biológico, se definen como macromoléculas generadas a partir de una amplia diversidad de recursos. Su rasgo distintivo reside en que provienen de materias primas renovables y de procedencia natural. Con frecuencia, se sintetizan a partir de subproductos agrícolas, de la celulosa o del almidón obtenido de cultivos como la papa y el maíz. De igual manera, pueden producirse empleando diferentes tipos de carbohidratos, entre ellos azúcares simples, polisacáridos como el almidón y la celulosa, lignina, lípidos de base biológica o aceites vegetales. (Soto-Velásquez *et al.*, 2023).

La aplicación de compuestos orgánicos en la elaboración de biopelículas constituye un desarrollo relativamente moderno. Un ejemplo es el polihidroxialcanoato, polímero que ciertos microorganismos sintetizan como mecanismo de almacenamiento de carbono y energía. Este material, identificado por primera vez en 1925, exhibe características físicas comparables a las de los plásticos derivados de recursos fósiles. (García *et al.*, 2012).

El aprovechamiento de materias primas de origen natural como recurso para promover la conservación y el reciclaje se ha consolidado como una estrategia novedosa dentro del desarrollo de productos biodegradables. Si bien la sustitución absoluta de los plásticos sintéticos por materiales de carácter biodegradable en el ámbito del envasado aún no se ha alcanzado, se han logrado reemplazar algunos polímeros tradicionales por alternativas de procedencia biológica en aplicaciones concretas. Dichas sustituciones han posibilitado la generación de productos con propiedades diferenciadas en cuanto a barrera, resistencia mecánica y comportamiento térmico, utilizables en múltiples tipos de empaques tales como láminas, recubrimientos protectores, espumas, envoltorios, utensilios y bolsas. (Villada, *et al.*, 2006).

Es importante señalar que los plásticos biodegradables, los cuales pueden originarse a partir de compuestos petroquímicos y degradarse posteriormente mediante la acción de macroorganismos, no deben confundirse con los biopolímeros, ya que estos últimos se generan directamente a partir de biomasa.

Los polímeros provenientes de biomasa se agrupan en tres categorías fundamentales, determinadas por su fuente de origen y el método de síntesis, como se muestra en la Figura 2. (Parra Joselyne, 2019).

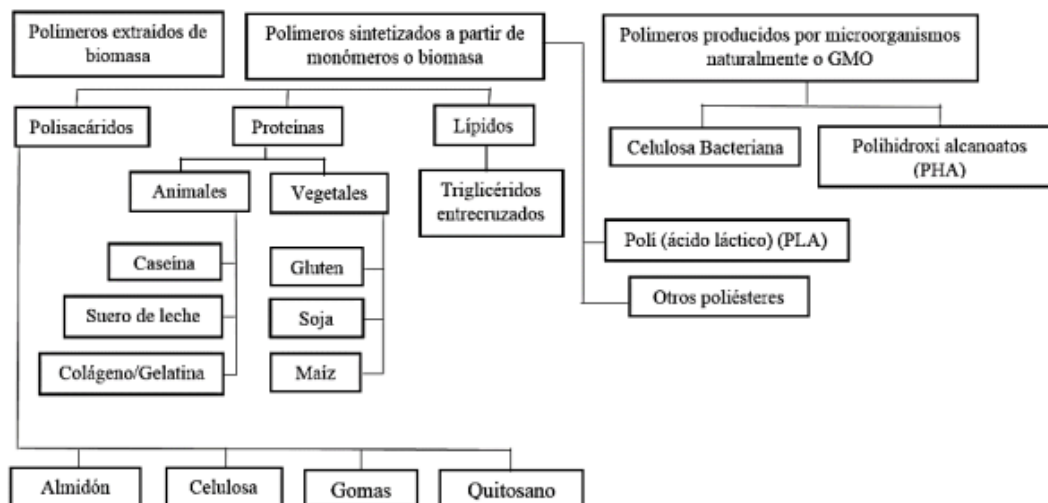


Figura 2. Clasificación de los materiales biopoliméricos según su origen y método de producción.

#### 1.4.1. Quitosano

Dentro de los compuestos derivados de la quitina destaca el quitosano, considerado un polímero semisintético integrado en la familia de las poliaminas glucosídicas, el cual se obtiene a través de un proceso de desacetilación parcial de la quitina. Desde la perspectiva química, corresponde a un polímero lineal constituido por unidades de D-glucosamina (fracción desacetilada) y N-acetil-D-glucosamina (fracción acetilada), unidas de manera covalente y distribuidas aleatoriamente a lo largo de la cadena. (Carrero, 2019).

Las películas poliméricas igualmente pueden elaborarse a partir del quitosano y de sus compuestos derivados; sus características mecánicas, de permeabilidad y de degradación biológica siguen siendo materia de estudio. Este biopolímero posee actividad antifúngica y antimicrobiana, lo que permite que las películas desarrolladas con quitosano contribuyan a extender la vida útil de los alimentos almacenados en estantes o exhibidores. (González-López *et al.*, 2023)

Diversas investigaciones sobre mezclas de quitosano con almidón han revelado que estas composiciones presentan una elevada capacidad de transporte de gases y un fortalecimiento de sus propiedades estructurales (Villada, *et al.*, 2006).

#### **1.4.2. Almidón**

El almidón constituye un recurso natural ampliamente disponible, se puede aislar de todos los cereales, tubérculos y algunos frutos inmaduros (Molina *et al.*, 2019), Este polisacárido muestra comportamientos termoplásticos al experimentar modificaciones estructurales a escala molecular. Un contenido aproximado del 70 % de amilosa en los almidones confiere a la película una estructura resistente y flexible, mientras que la estructura ramificada de la amilopectina suele otorgarle propiedades mecánicas deficientes. (Prieto-Méndez *et al.*, 2010).

Las investigaciones sobre plásticos biodegradables basados en almidón comenzaron en la década de 1970 y continúan actualmente en diversos laboratorios a nivel mundial. El desarrollo tecnológico sigue avanzando, principalmente en relación con la incorporación de gránulos de almidón o almidón gelatinizado en la formulación de películas mediante procesos de compresión y extrusión. Una desafío constante en las películas derivadas de almidón es su alta afinidad por la humedad, problema que se ha buscado atenuar mediante el desarrollo de formulaciones que incorporan polivinilalcohol (PVA), glicerina, sorbitol, compuestos nitrogenados, entre otros aditivos.(Villada, *et al.*, 2006).

#### **1.4.3. Proteínas**

Dentro de los materiales utilizados para la producción de biopolímeros, las proteínas, como el colágeno, ocupan un lugar relevante. Las películas basadas en colágeno se emplean habitualmente en la fabricación de recubrimientos comestibles.(Valle-Álvarez and Aldás-Sandoval, 2017).

El colágeno representa el componente principal de la piel, los tendones y otros tejidos conectivos, siendo una proteína fibrosa característica de los animales. La gelatina, obtenida mediante la hidrólisis parcial del colágeno, permite la formación

de películas flexibles y de mayor espesor. En la actualidad, los embutidos se recubren tanto con materiales proteicos, como la gelatina, como con formulaciones que combinan quitosano y gelatina.(Villada, *et al.*, 2006).

Las películas se obtienen a través de distintos procedimientos, y estas láminas delgadas, con un espesor cercano a 2,5 mm, se emplean como recubrimientos de alimentos o como barreras separadoras. (Salazar-Palma, 2020).

Las películas fabricadas a partir de proteínas actúan como barreras frente al paso de humedad, oxígeno, dióxido de carbono, lípidos y compuestos volátiles. Su aplicación como material de envasado ayuda a disminuir y retardar el deterioro de la calidad de los alimentos, al tiempo que extiende su vida útil. (Cavero *et al.*, 2016).

#### **1.4.4. Fibras**

Las fibras constituyen un tipo de material que presenta características particulares y diversas propiedades pueden absorber esfuerzos mecánicos presentados al incorporarse en algunos materiales (Cavero,*et al.*, 2016).

Las fibras naturales utilizadas como material de refuerzo son aquellas que mejoran las condiciones físicas, químicas y mecánicas de los biopolímeros, y provienen principalmente de la celulosa. Existen tres tipos de fibras naturales: vegetal, animal y mineral (Hernández-Centeno *et al.*, 2020).

Las propiedades mecánicas presentes en la fibra natural dependen de diferentes factores como la ubicación de la planta de donde se extrae, la madurez, las condiciones climáticas, el método de extracción y los tratamientos químicos y físicos a los cuales son sometidas para así poder implementarlas en la estructura polimérica. El empleo de dichas fibras en materiales de construcción o embalaje ha presentado resultados satisfactorios al mejorar los costos, las propiedades físico-químico-mecánicas y ser amigable con el medio ambiente, es por eso por lo que se usan para reducir el uso de materiales plásticos y la reducción de la contaminación (Hernandez-Perez, 2021).

#### **1.4.5. Polihidroxicanoatos (PHA's)**

Ciertos microorganismos producen y almacenan polihidroxicanoatos, biopolímeros que funcionan como depósitos de carbono y energía, particularmente bajo condiciones de limitación de nutrientes. La producción de PHA's está relacionada con un sistema genético que codifica diversas proteínas responsables de la formación de gránulos. Estos biopolímeros han ganado relevancia debido a su alta tasa de degradación. Una de las principales ventajas de los PHA's en comparación con los plásticos provenientes del petróleo es su capacidad de biodegradarse, lo que evita la acumulación en el medio ambiente. Los materiales de este tipo poseen diversas aplicaciones, que abarcan desde empaques de corta y larga duración hasta injertos médicos, productos de aseo y combustibles biológicos. (Serrano Riaño, J. Y. 2010).

Resulta fundamental un análisis exhaustivo de esta materia prima, dado que constituye una fuente prácticamente inagotable de recursos y ofrece nuevas alternativas capaces de satisfacer muchas de las diversas exigencias actuales de la sociedad, así como aquellas que surgirán en el futuro.

#### **1.5. Ventajas del uso de biopolímeros como sustituto de los plásticos**

Una de las ventajas de los biopolímeros es que son opciones más sostenibles. Las evidencias sugieren que los biopolímeros constituyen una alternativa viable para reemplazar las resinas utilizadas en la actualidad para la fabricación de artículos plásticos. (Soto Velásquez *et al.*, 2023).

Las propiedades funcionales pueden incrementarse mediante la adición de otros grupos químicos sustituyendo o mediante algún entrecruzamiento artificial para que se vuelva más resistente. Los biopolímeros presentan baja permeabilidad y, por lo tanto, son materiales atractivos para el envasado de alimentos (Hernández-Silva and Guzmán-Martínez, 2009).

La capacidad de paso del vapor de agua es elevada, alcanzando un orden de magnitud similar al observado en el celofán y otras películas derivadas de

carbohidratos. Los biopolímeros presentan además transparencia, son claros, resistentes y flexibles, ofreciendo una buena barrera frente al oxígeno. Asimismo, protegen los alimentos de la degradación causada por hongos y permiten modificar la atmósfera de frutos frescos.(Hernández-Silva and Guzmán-Martínez, 2009).

El objetivo primordial de los envases es conservar y proteger diversos productos, destacando los alimentos y los insumos de máxima relevancia. Esta protección se logra mediante empaques elaborados principalmente con polímeros sintéticos. Sin embargo, la utilización desmedida de estos materiales ha generado importantes impactos ambientales, al contribuir a la contaminación causada por residuos sólidos de degradación lenta, lo que subraya la necesidad de explorar biopolímeros de origen natural como sustitutos de los plásticos. En este marco, la explotación sostenible de recursos naturales para su conservación y reciclaje surge como una estrategia prometedora para enfrentar esta problemática.(Villada, *et al.*,2007).

#### **1.6. Desventajas del uso de biopolímeros como sustituto de los plásticos**

Comparados con polímeros derivados del petróleo, los envases a base de biopolímeros presentan alta higroscopicidad, propiedades mecánicas inferiores y niveles superiores de permeabilidad al vapor de agua (Andrés and Amaya, 2017). Una alternativa para mitigar estas limitaciones es la formulación mediante mezclas de biopolímeros; sin embargo, su implementación no siempre resulta sencilla. Entre los desafíos asociados a la combinación de almidón con otros biopolímeros en materiales de envasado se encuentran problemas de compatibilidad cuando la proporción de almidón es elevada, el mantenimiento de las propiedades mecánicas en mezclas con alto contenido de este polisacárido, así como la optimización de costos, particularmente en formulaciones biodegradables de almidón y poliéster con concentraciones bajas de almidón ( $\leq 30$  % en peso). (Gadhavé *et al.*, 2018).

## **1.7. Propiedades físicas para considerar en la confección de las películas biobasadas**

En el caso de los bioplásticos, resulta esencial que estos materiales biológicos posean atributos de degradación biológica y comportamientos funcionales apropiados, de manera que constituyan una alternativa factible frente a los materiales fabricados a partir de polímeros sintéticos o derivados del petróleo.

Las cualidades necesarias para la elaboración de membranas biodegradables destinadas al envasado de alimentos son semejantes a las que presentan los polímeros sintéticos. De acuerdo con la literatura, estos materiales deben ser compatibles con el alimento, ofreciendo protección frente a contaminantes externos, oxígeno, radiación luminosa, vapor de agua y agentes microbiológicos. Estos materiales requieren contar con propiedades apropiadas en términos de resistencia mecánica, facilidad de procesamiento, transparencia, así como disponibilidad y rentabilidad. Otra característica que ha adquirido relevancia creciente es el origen del material y la forma en que se elimina el envase al final de su ciclo de vida, es decir, la solubilidad y degradabilidad del mismo. (Mayhuire *et al.*, 2019).

### **1.7.1. Propiedades mecánicas**

Con el fin de asegurar la conservación de los alimentos y facilitar su manejo, las películas elaboradas a partir de almidón deben exhibir resistencia tanto al desgarro como al desgaste por fricción. La estructura y el método de elaboración de estas películas delgadas determinan sus propiedades mecánicas. Para evitar la ruptura, los enlaces moleculares deben formar conexiones entre las cadenas poliméricas. (Yoplac, 2021).

La incorporación de plastificantes incrementa la flexibilidad de las películas, aunque a costa de una disminución en su resistencia mecánica. Para analizar la respuesta de estas películas frente a cargas mecánicas externas, se aplican distintas pruebas de tensión-deformación, cuya efectividad depende del espesor

y de las características de los materiales empleados en su elaboración. (Mali et al., 2005).

Las características estructurales de un material comprenden todas aquellas características que se manifiestan cuando el material es sometido a esfuerzos de tensión, lo que permite distinguirlo de otros materiales (Guede, 2013). Se reconoce que estas constituyen uno de los atributos más significativos en los materiales de envasado alimentario. Durante un ensayo de mecánica de deformación, se analizan tres propiedades mecánicas: La máxima resistencia que presentan las películas frente a la aplicación de esfuerzo antes de su ruptura se denomina tensión a la fractura (TF), mientras que el grado de deformación expresado en porcentaje se conoce como porcentaje de elongación (%E). Indica cuanto puede alargarse un material antes de la rotura (Wang *et al.*, 2007, Mikus *et al.*, 2014), indica la flexibilidad y capacidad de deformación del material antes de romperse. Finalmente, el módulo de elasticidad (ME) o módulo de Young hace referencia a la resistencia de un material a deformarse elásticamente cuando se le aplica un esfuerzo (Guede, 2013). La Figura 3 presenta una representación esquemática de un ensayo mecánico, el conocimiento de las propiedades mecánicas de un material resulta esencial para garantizar la integridad del envase durante el almacenamiento, transporte y manipulación de los alimentos logísticos (Yoplac, 2021). Un material con alta tensión a la fractura es más resistente a fuerzas externas, mientras que un mayor alargamiento indica mayor elasticidad, lo que puede ser beneficioso para ciertos tipos de envasado. Además, factores como la temperatura, la humedad, y la constitución del biopolímero pueden influir en estas propiedades mecánicas, afectando su desempeño en aplicaciones específicas dentro de la industria alimentaria (Cavero, *et al.*, 2016).



Figura 3. Representación esquemática del ensayo mecánico.

### 1.7.2. Propiedades estructurales

La microscopía electrónica de barrido (SEM) constituye la técnica más empleada para analizar la morfología y la microestructura de los materiales, ya que permite el estudio tanto de estructuras internas como superficiales. A diferencia de las imágenes obtenidas mediante microscopía de transmisión, que son proyecciones bidimensionales de alta resolución, la SEM ofrece una considerable profundidad de campo, lo que posibilita la obtención detallada de la superficie y representaciones tridimensionales (Canevarolo, 2003).

### Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)

Por otro lado, la espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) es una técnica que se fundamenta en la exposición de materiales orgánicos a luz monocromática. La absorción de energía por parte de estos materiales depende de la naturaleza de los enlaces químicos y de las interacciones electrostáticas entre átomos y moléculas. La absorción de energía se traduce en señales de reflectancia, lo que posibilita la obtención de un espectro único para cada material, permitiendo así determinar su composición química. Esta energía se cuantifica mediante el escaneo del espectro utilizando un haz monocromático cuya longitud de onda se ajusta de manera progresiva. A partir de este proceso

se genera un espectro de transmitancia o absorbancia, el cual revela las longitudes de onda en las que la muestra absorbe radiación infrarroja, facilitando su análisis e interpretación. (Trela *et al.*, 2018).

### **Difracción de rayos X**

Los métodos de difracción empleados en polímeros policristalinos han sido aplicados desde el hallazgo de la difracción de rayos X en cristales hasta la actualidad.

La difracción de rayos X se utiliza para analizar la estructura cristalina de un material nuevo; asimismo, la estructura cristalina conocida de un material común puede emplearse para identificar su composición química. (Tirado-Gallegos *et al.*, 2024).

En un material, los átomos actúan como puntos de dispersión para los rayos X. La dispersión ocurre debido a la interacción entre un fotón de esta radiación electromagnética y un orbital electrónico de un átomo. Un cristal puede considerarse como una red tridimensional de difracción, y la difracción de rayos X se produce cuando los haces dispersados por planos cristalinos contiguos se encuentran en fase. Si no ocurre esto, se produce una interferencia destructiva de las ondas dispersadas, lo que resulta en una intensidad difractiva prácticamente nula. (Jaramillo, 2011).

### **Porcentaje de cristalinidad (%)**

La cristalinidad es una propiedad asociada al grado de orden molecular. De este modo, un material cuyas moléculas están dispuestas de manera ordenada se clasifica como cristalino, mientras que una sustancia carente de orden molecular se considera amorfa. (Mayhuire *et al.*, 2019).

En los polímeros, los conceptos de cristalino y amorfo se utilizan para describir, respectivamente, las zonas organizadas y desorganizadas del material. La existencia de estructuras cristalinas o amorfas en un polímero está determinada principalmente por su arquitectura molecular y por el procedimiento de

procesamiento empleado. (Cavero, *et al.*, 2016). Como se aprecia en la Figura 4 el modelo esquemático del estado amorfo y el estado cristalino.

Se consideran polímeros cristalinos aquellos cuyas estructuras presentan regularidad química y estereoquímica. El nivel de cristalinidad de un polímero depende de la composición de su cadena, de manera que cualquier irregularidad que altere su secuencia regular reduce esta característica, como se puede observar en la Figura 4 del modelo esquemático del estado cristalino.

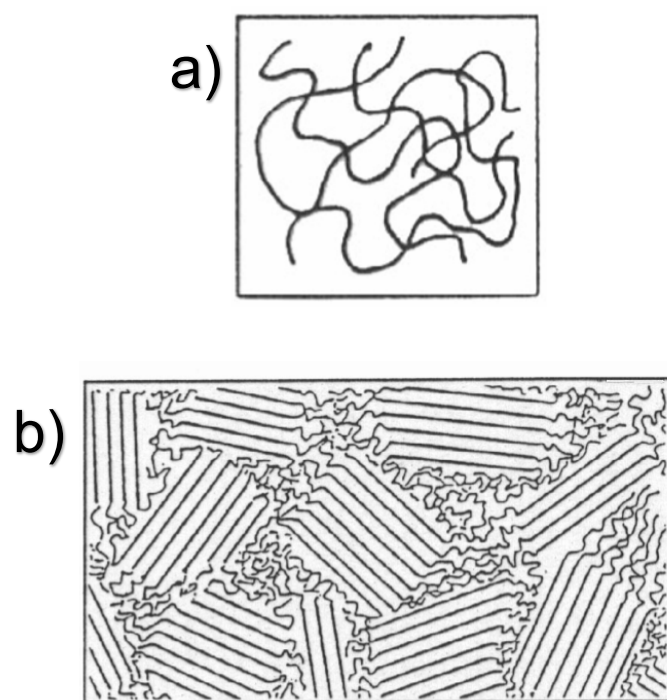


Figura 1. Modelos esquemáticos del estado amorfo (a) y cristalino (b).

La cristalinidad igualmente disminuye en polímeros de bajo masa molecular, como consecuencia del impacto de los grupos terminales presentes en la cadena. Por el contrario, algunos polímeros presentan un alto grado de cristalinidad gracias a su estructura, que favorece un ordenamiento eficiente; otros lo logran principalmente por la presencia de fuertes interacciones secundarias, mientras

que en muchos casos la combinación de ambos factores resulta favorable para la cristalización. (Carrero, 2019).

### **1.7.3. Estabilidad frente a la humedad (solubilidad)**

La solubilidad permite evaluar la fuerza de las interacciones presentes entre las estructuras de almidón. La intensidad de estas interacciones depende de la proporción entre amilosa y amilopectina, así como de las propiedades específicas de cada una, incluyendo su masa molecular, distribución y grado y longitud de ramificación. De igual manera, la solubilidad se encuentra influenciada por las variaciones en la estructura morfológica de los gránulos de almidón. (Trela *et al.*, 2018).

Las películas actúan regulando el intercambio de masa en los alimentos, Se trata de un proceso influenciado por un parámetro externo, el diferencial de actividad del agua, y por dos internos: el coeficiente de solubilidad (S), que refleja la afinidad del alimento hacia el agua, y el coeficiente de difusividad (D), asociado con la velocidad de transporte del agua dentro del sistema..(Agudelo-Zamudio *et al.*, 2023).

### **1.7.4. Propiedades ópticas**

Las características ópticas se relacionan con la interacción de un material con la radiación electromagnética, la cual puede comportarse como ondas o partículas de energía, como los fotones. Esta radiación puede presentar características que son detectables dentro del espectro de luz visible. (Yoplac, 2021).

#### **Color**

El color constituye un fenómeno biofísico complejo que resulta del comportamiento de la luz según sus diferentes longitudes de onda y la percepción que de ellas realiza el ojo humano. No se trata de una propiedad intrínseca del objeto, sino de la luz que emite o refleja y que llega a nuestros ojos. Por esta razón, la luz es el factor determinante en la percepción visual del color. La luz se

constituye de ondas electromagnéticas las cuales pueden descomponerse en diversas longitudes de onda, generando un amplio espectro. La región de la luz visible, que alcanza nuestros ojos, abarca el rango de 400 a 700 nm, y todos los colores que percibimos se encuentran dentro de este intervalo. La percepción del color depende de tres factores principales: la fuente de luz, el objeto observado y el observador (Santos et al., 2023).

### **Transparencia u opacidad**

La transparencia se puede cuantificar mediante un coeficiente de transmisión, que representa la intensidad de la luz que atraviesa una unidad de espesor del material. Esta propiedad refleja tanto la intensidad como las características de la luz que se transmite y se refleja. (Santos *et al.*, 2023).

#### **4.5.6. Propiedades de barrera**

La permeabilidad al vapor de agua (PVA) y al oxígeno (PO) constituye un conjunto de propiedades de barrera que generalmente determinan la capacidad de una película para proteger un producto frente al entorno. Tanto estas propiedades de barrera como las características mecánicas están influenciadas por la composición y la estructura de la película. (Zamudio- Castellanos *et al.*, 2014).

#### **Permeabilidad al vapor de agua (PVA)**

Al diseñar películas bio-basadas, es fundamental considerar la permeabilidad al vapor de agua, gases, solutos y lípidos. Esta característica se refiere al flujo de dichos componentes sin tomar en cuenta el espesor de la barrera. Según Bósquez (2003), En frutas y verduras, el objetivo es restringir la transpiración y limitar la absorción de oxígeno, con el fin de reducir la tasa respiratoria de los alimentos. Las características de permeabilidad de las biopelículas comestibles suelen ser inevitables debido a la composición química y a la organización de los polímeros que las integran, lo que afecta de manera directa la efectividad de los recubrimientos. Los materiales más empleados en el desarrollo de estas

películas son aquellos de alta polaridad y con numerosos enlaces de hidrógeno, que presentan gran transmisión de gases pero baja al vapor acuoso. Por otro lado, los materiales de naturaleza no polar, como los lípidos, actúan como barreras eficaces frente a la transpiración, aunque facilitan la difusión de gases. De esta manera, los polímeros pueden clasificarse en hidrocoloides e hidrófobos. Dentro de los hidrocoloides se encuentran polisacáridos y proteínas, mientras que los hidrófobos comprenden principalmente lípidos.

La estructura y composición de las biopelículas influyen en el proceso de transferencia de agua y, por ende, en su rendimiento como barrera. Asimismo, afectan las propiedades fisicoquímicas de la sustancia que atraviesa la barrera, incluyendo su concentración y afinidad por la humedad. (Zamudio- Castellanos *et al.*, 2014).

La efusividad (E), expresada en unidades  $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , Describe el movimiento de difusión de moléculas gaseosas a través de pequeños poros presentes en una barrera. El grosor de la película puede influir en sus características, incluyendo su eficacia como barrera, mientras que la velocidad de transferencia de vapor de agua se define como la cantidad de vapor que atraviesa una determinada superficie de la película en un intervalo de tiempo específico. (Zamudio- Castellanos *et al.*, 2014).

#### **4.5.7. Biodegradabilidad de los polímeros biobasado**

Más que su procedencia, es el acomodo químico de los materiales define su biodegradabilidad. (Villada, Acosta and Velasco, 2006).

La biodegradabilidad hace referencia a la degradación de materiales o muestras mediante la acción de bacterias, proceso que puede ocurrir principalmente bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas. La primera requiere de la presencia de oxígeno y como productos se forman  $\text{CO}_2$ , biomasa y otros productos. La segunda se lleva a cabo en un ambiente libre de oxígeno, donde se forma  $\text{CH}_4$  principalmente,  $\text{CO}_2$ , biomasa y otros productos (Valle-Álvarez and Aldás-Sandoval, 2017).

En los polímeros, la biodegradabilidad tiende a ser inversamente proporcional a las características físicas y térmicas del material. Asimismo, está determinada por la uniformidad de la mezcla, la cual depende de las interacciones entre los componentes que la conforman.(Andrés and Amaya, 2017).

Durante la biodegradación, los materiales de igual manera son influenciados por agentes bióticos y abióticos, los cuales dependen del tipo de análisis que se realice. (Andrés and Amaya, 2017):

**Temperatura:** Hace referencia a la temperatura del sustrato; según este parámetro, la actividad microbiana puede incrementarse o reducirse. Asimismo, la temperatura puede inducir la ruptura de las cadenas poliméricas, facilitando la acción microbiana.

**Humedad:** Se entiende como la cantidad de agua contenida en los poros del sustrato. Esta agua cumple dos funciones principales: funcionar como depósito de agua para los microorganismos y promover la hidrólisis, es decir, la descomposición del polímero por acción del líquido, lo que rompe enlaces covalentes y aumenta el área expuesta a la actividad microbiana.

**Porosidad:** Representa a proporción de porosidad en el sustrato, un elemento que restringe la disponibilidad de oxígeno disponible y condiciona el carácter aeróbico o anaeróbico del medio.

Las pruebas de biodegradabilidad constituyen aproximaciones controladas de los resultados que se podrían obtener en distintos escenarios ambientales. Se eligen en función del tipo de efecto o la magnitud que se pretende analizar. Entre los ensayos más comunes se incluyen la degradación en agua, en la cual, además de evaluar la velocidad de biodegradación, se realiza un seguimiento de la acumulación de subproductos; degradación térmica, que evalúa los cambios en las propiedades de los polímeros bajo condiciones de incineración; y degradación por enterramiento, utilizada para simular la biodegradación en suelos, composta o rellenos sanitarios.(Andrés and Amaya, 2017).

#### **4.6. Aplicaciones de los polímeros biobasados**

Los polímeros artificiales se encuentran progresivamente sustituidos por polímeros biodegradables, principalmente de origen natural, en diversas aplicaciones agrícolas e industriales. (Villada, *et al.*, 2006).

El empleo de biopolímeros ofrece un amplio espectro de oportunidades y beneficios económicos en el ámbito de los empaques, ya que los materiales naturales cuentan con propiedades similares a las de los sintéticos, incluyendo destacables propiedades mecánicas, de barrera y de transmisión de luz. Por estas razones, la producción, procesamiento, transformación y comercialización de biopolímeros en el sector agroindustrial pueden ser aprovechadas para el desarrollo de envases bio-basados. (Villada, *et al.*, 2006).

Actualmente, se aprecia una creciente inclinación hacia el uso de biopolímeros, dado su reducido impacto ambiental y su capacidad de biodegradación, siendo empleados en materiales de envasado y embalaje de alimentos, productos agropecuarios, dispositivos médicos, artículos de higiene, entre otros. (Ratner and Bryant, 2004).

Estos materiales constituyen una alternativa viable a los polímeros convencionales, contribuyendo a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas. Su relevancia es notable, dado que se emplean en diversas áreas, como cosméticos, salud y conservación de alimentos. (Flores, 2022).

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Obtención del almidón

Las raíces de *Cucurbita foetidissima* Kunth fueron recolectadas en el campus Buenavista de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, situada en Saltillo, Coahuila, México (coordenadas: 25°22' N, 101°02' O; altitud: 1742 msnm), en una región con clima predominantemente seco.

El suelo donde se llevó a cabo la recolección exhibe una textura migajosa a arcillosa, con escaso contenido de materia orgánica y una capa subyacente rica en carbonato de calcio.

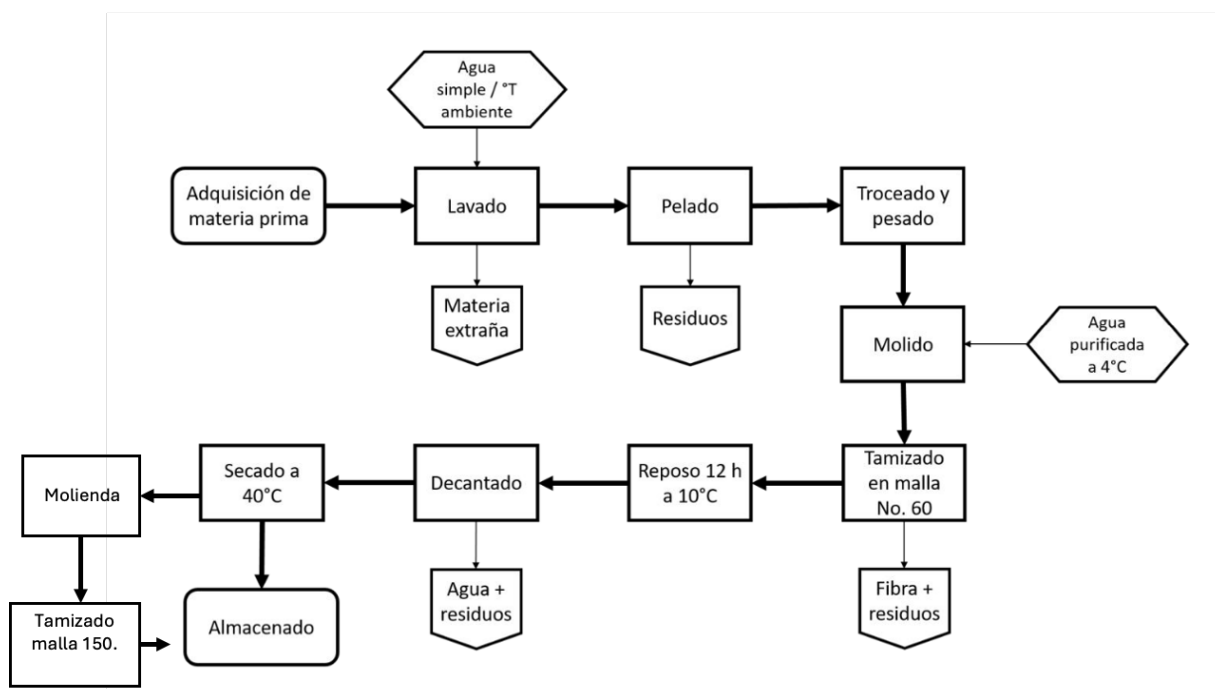


Figura 5. Procedimiento general para la obtención de almidón por vía húmeda a partir de raíces de calabacilla loca (*C. foetidissima* Kunth).

El método de recolección consistió en la extracción manual de las estructuras de anclaje (raíces), cavando cuidadosamente alrededor de ellas para preservar los tejidos y eliminar residuos o materia extraña. Una vez recolectadas, las raíces

fueron llevadas al laboratorio del Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos, donde se extrajo el almidón siguiendo el procedimiento esquematizado en la Figura 5.

## **2.2. Acetilación del almidón nativo obtenido**

Para el desarrollo de almidón acetilado buscando un grado de sustitución (GS) <0.2; se utilizaron las metodologías reportadas por Trela (2018) y Xu, Miladinov & Hanna (2004) con algunas adecuaciones. Se pesaron 50 g de almidón no convencional, se añadieron 150 g de ácido acético glacial y se mezcló durante 5 min a 400 rpm en condiciones térmicas del ambiente. Se agregó de manera gradual 2.7 g de NaOH al 50% por cada 10 g de almidón, y se permitió la reacción a 110°C desde 0 a 15 min, manteniendo en agitación por 60 min en total. Posteriormente, en baño frío se bajó la temperatura a 50°C, se decantó el almidón por centrifugación a 4000 rpm por 10 min y se procedió a los lavados.

El primer lavado se realizó con alcohol etílico absoluto frío (6 °C), se centrifugó la mezcla a 4000 rpm por 10 min, el almidón se decantó y se lavó tres veces más con agua destilada bajo condiciones ambientales para remoción de residuos de los reactivos, utilizando los mismos parámetros para el centrifugado. Se secó el almidón a 40°C por 24 h en una estufa de convección forzada. Por último, el almidón se molió en un mortero y se tamizó en malla No. 150.

### **2.2.1. Determinación de grados de sustitución (GS) y % de grupos acetilo (%GA)**

La determinación del grado de sustitución (GS) y del porcentaje de grupos acetato (%GA) se efectuó siguiendo el procedimiento reportado por Gerra-DellaValle et al. (2008), efectuándose cada medición por triplicado y considerando un blanco.

Para el acondicionamiento, se tomó 0.1 g de almidón acetilado y de la muestra blanco, colocándolos en matraces Erlenmeyer de 250 mL, los cuales se sometieron a secado a 110 °C durante 2 horas en una estufa de convección

forzada. Posteriormente, los matraces se enfriaron en un desecador a condiciones ambientales durante 30 minutos.

Una vez finalizado el acondicionamiento, se agregaron 20 mL de solución de etanol al 75% y los sistemas se llevaron a un baño de agua a 55 °C durante 30 minutos. Luego, se incorporó una gota de fenolftaleína al 1% y se realizó una primera titulación con NaOH 0.1 N hasta observar la primera modificación de color.

A continuación, se incorporaron 20 mL de NaOH 0.1 N y los matraces fueron sometidos a calentamiento 55 °C en una parrilla eléctrica durante 15 minutos. Las bocas de los matraces fueron selladas con papel Parafilm® y los sistemas se dejaron reposar en condiciones ambientales durante 48 horas, tras la finalización de este tiempo, se llevó a cabo una segunda titulación de retroceso utilizando HCl 0.1 N, en la cual no se añadió fenolftaleína. El proceso concluyó cuando la muestra cambió de un color rosado a un tono blanquecino.

Con el fin de determinar el porcentaje de acetilación, se empleó la Ecuación 1. (Wurzberg, 1986, en Cardoso-Oliver, 2022) y para grados de sustitución se utilizó la Ecuación 2 (Wurzberg, 1986, en Cardoso-Oliver, 2022).

$$\% \textit{ acetilación} = \frac{(\textit{ mL bco} - \textit{ mL muestra}) * \textit{ N HCL} * 100}{\textit{ g muestra (base seca)}} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\textit{ GS} = \frac{162 * \% \textit{ acetilación}}{4300 - (42 * \% \textit{ acetilación})} \quad (\text{Ec. 2})$$

### 2.3. Formulación de películas

Las películas fueron preparadas de acuerdo con el procedimiento reportado por Hernández-Centeno et al. (2020), incorporando ciertas modificaciones. Para ello, se emplearon microfibras de lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.), obtenidas en un estudio previo, así como dos tipos de almidón: nativo y acetilado de calabacilla loca. Las soluciones filmogénicas se prepararon de acuerdo con lo indicado en el Cuadro 1, generando un total de 16 tratamientos, cada uno con tres repeticiones.

Todos los componentes, con excepción del glicerol, se colocaron en un vaso de precipitados y se agitaron a 400 rpm hasta obtener una mezcla homogénea, la cual se calentó a 85 °C durante 15 minutos a 800 rpm, con el fin de gelatinizar los gránulos de almidón e incorporar las fibras. A continuación, la mezcla se enfrió a 70 °C, se añadió el glicerol y se continuó la agitación durante 15 minutos a 800 rpm.

Finalmente, el preparado filmogénico se enfrió hasta alcanzar la temperatura de 45 °C y se vertió en moldes de acrílico de 15 cm × 15 cm, empleando 45 g de solución por molde, asegurando su distribución uniforme.

Cuadro 1. Tratamientos de formulación de soluciones filmogénicas.

<b>Tratamiento</b>	<b>Microfibra de Lechuguilla (%)</b>	<b>Almidón Nativo (%)</b>	<b>Almidón Modificado (%)</b>	<b>Agua (%)</b>	<b>Glicerol (%)</b>
<b>T0n</b>	0.00	4.00	0.00	94.00	2.00
<b>T1n</b>	0.01	4.00	0.00	93.99	2.00
<b>T2n</b>	0.05	4.00	0.00	93.95	2.00
<b>T3n</b>	0.10	4.00	0.00	93.90	2.00
<b>T4n</b>	0.25	4.00	0.00	93.75	2.00
<b>T5n</b>	0.50	4.00	0.00	93.50	2.00
<b>T6n</b>	0.75	4.00	0.00	93.25	2.00
<b>T7n</b>	1.00	4.00	0.00	93.00	2.00
<b>T0a</b>	0.00	0.00	4.00	94.00	2.00
<b>T1a</b>	0.01	0.00	4.00	93.99	2.00
<b>T2a</b>	0.05	0.00	4.00	93.95	2.00
<b>T3a</b>	0.10	0.00	4.00	93.90	2.00
<b>T4a</b>	0.25	0.00	4.00	93.75	2.00
<b>T5a</b>	0.50	0.00	4.00	93.50	2.00
<b>T6a</b>	0.75	0.00	4.00	93.25	2.00
<b>T7a</b>	1.00	0.00	4.00	93.00	2.00

**(Elaboración propia)**

Los moldes que contenían las soluciones filmogénicas por 48 horas a 35 °C en una estufa de convección forzada. Al finalizar el secado, se retiraron con cuidado de los moldes, se cortaron en cuadrados de 6 cm × 6 cm, se identificaron y se conservaron en bolsas tipo Ziploc® en un lugar fresco y seco a temperatura ambiente, hasta su posterior caracterización.

**Color e índice de amarillamiento (YI)**

Este parámetro se evaluó siguiendo el procedimiento descrito por Kaushik et al. (2014). Se empleó un colorímetro CR-400 Konica Minolta para registrar los valores de L\*, a\*, b\*, croma, °Hue y ΔE, realizando tres mediciones por cada repetición. Las películas, previamente acondicionadas y cortadas en cuadrados de 6 cm × 6 cm, se utilizaron para calcular el índice de amarillez (YI) mediante la Ecuación 3.

$$YI=142.86(b^*/L^*) \quad (\text{Ec.3})$$

**2.4. Determinación de grosor**

Esta característica de las películas, se determinó recién preparadas en milímetros siguiendo una forma en espiral, utilizando un micrómetro digital Mitutoyo™ modelo H-2780 (Mitutoyo Co., Kanagawa, Japón), conforme al protocolo reportado por Tirado-Gallegos et al. (2018).

**2.5. Determinación de opacidad**

La turbidez de las películas se evaluó mediante la determinación inmediata de la absorbancia a 600 nm, utilizando un espectrofotómetro UV/Vis Labomed modelo UVS-2700 (Labomed Inc., California, USA), y calculándose según la ecuación 4 propuesta por Anchundia et al. (2016).

$$\text{opacidad} = ABS_{600nm}/\text{grosor}(mm) \quad (\text{Ec.4})$$

## **2.6. Determinación de solubilidad**

Este parámetro se evaluó conforme al procedimiento reportado por Hernández-Centeno et al. (2021), incorporando ciertas modificaciones. Se utilizó 1 g de muestra, la cual se depositó en un vaso de precipitados con 50 mL de agua destilada a temperatura ambiente y se sometió a agitación constante durante 6 h. Simultáneamente, se secó papel filtro hasta alcanzar peso constante en una estufa de convección forzada a 110 °C.

La muestra se filtró empleando papel filtro previamente acondicionado y, posteriormente, se secó nuevamente en una estufa de convección forzada a 110 °C durante 2 h. Finalmente, se registró el peso del residuo de la película retenido en el papel filtro y se calculó el porcentaje de solubilidad mediante la diferencia de peso. Este procedimiento se llevó a cabo por triplicado.

## **2.7. Determinación químico-estructural de las películas por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR/ATR)**

Para obtener los espectrogramas de infrarrojo se utilizó un equipo FTIR/ATR Perkin Elmer™ modelo Spectrum Two (Perkin Elmer Inc., Buck, U.K.), siguiendo el protocolo reportado por Kwon et al. (2017). La deconvolución de los espectrogramas de todas las películas se realizó mediante el software SPECTRUM™ 10, versión 10.6.2 (Perkin Elmer, Inc., Bucks, U.K.), con el fin de analizar con mayor precisión las regiones de interés, enfocándose específicamente en el rango de números de onda entre 800 y 1200  $\text{cm}^{-1}$ , en modo absorbancia.

## **Determinación de índice de cristalinidad aparente**

El índice de cristalinidad aparente de las películas se calculó a partir del cociente entre las bandas 1044/1016  $\text{cm}^{-1}$ , las cuales han demostrado correlacionarse con las fracciones cristalina y amorfa de los almidones. (Warren et al., 2016). Este

análisis permite estimar los cambios en la estructura cristalina que se presentaron en las películas elaboradas en el presente estudio.

### 2.7.1. Determinación del índice de afinidad al agua

La evaluación de este parámetro se llevó a cabo siguiendo el método descrito por Dios-Ávila et al. (2022), calculándose como el cociente entre las intensidades de las bandas 995/1022  $\text{cm}^{-1}$  del espectro IR. Para cada tratamiento se realizaron tres réplicas.

### 2.8. Evaluación de las propiedades mecánicas y de permeabilidad al vapor de agua (PVA)

En cuanto a las características mecánicas, la tensión a la fractura (TF) y el porcentaje de elongación a la fractura (%E) se evaluaron siguiendo lo descrito por Zamudio-Flores et al. (2015), con base en la norma ASTM D882-10 y algunas modificaciones. Las probetas de 1 cm × 6 cm se acondicionaron a  $55 \pm 5$  % de humedad relativa durante 24 h a  $25 \pm 2$  °C. Se realizaron cinco repeticiones por tratamiento utilizando un texturómetro Brookfield™ modelo CT3 (Brookfield Engineering Laboratories Inc., Massachusetts, USA) con celda de carga de 4 kg, y los datos se procesaron mediante el software Texture Pro CT versión 1.9.35 (Brookfield Engineering Laboratories Inc., Massachusetts, USA). Los cálculos se llevaron a cabo aplicando las Ecuaciones 5 y 6, respectivamente.

$$TF = W/Ac \quad (Ec.5)$$

$$\% E = (\Delta L/L0) \times 100 \quad (Ec.6)$$

Donde **W** es la fuerza a la ruptura (N), **Ac** es el área de contacto original de la probeta de la película acondicionada ( $\text{m}^2$ ),  **$\Delta L$**  es la longitud alcanzada al finalizar la prueba (mm) y **L0** es la longitud original de la probeta de la película acondicionada (mm).

La permeabilidad frente al vapor (PVA) se evaluó conforme al procedimiento descrito por Yao et al. (2021), basada en la norma ASTM E96-00, incorporando ciertas adaptaciones. Se emplearon muestras de películas de 6 cm × 6 cm y se

estableció el sistema de humedad con NaCl y agua destilada, logrando una humedad relativa de  $75 \pm 5\%$  a  $25 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ . Las determinaciones se llevaron a cabo en celdas acrílicas con un diámetro de exposición de 50 mm, calculándose el PVA con la ecuación 7 indicada por los autores.

$$PVA = \frac{W \times x}{t \times A \times \Delta P} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde **W** representa la cantidad total de sustancia transferida a través de la superficie durante el tiempo de análisis (g), **x** corresponde al espesor de la película empleada (mm), **t** es el tiempo durante el cual ocurre el proceso de transferencia (s), **A** indica el área de la superficie de transferencia ( $\text{m}^2$ ),  $\Delta P$  representa la diferencia de presión entre los dos lados de la membrana que actúa como fuerza impulsora del proceso de difusión o transporte (Pa).

## 2.9. Difracción de rayos X (DRX)

Los difractogramas de los materiales se obtuvieron utilizando la metodología descrita por Tirado-Gallegos *et al.* (2016), en un modelo PANalytical Empyrean (Malvern PANalytical Inc., Malvern, Reino Unido), con radiación  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ) en el rango de  $2\theta = 10\text{--}80^\circ$  a una velocidad de escaneo de  $0,02^\circ/\text{s}$ , 40 kV y 30 mA, a condiciones ambientales. El porcentaje de cristalinidad se obtuvo con la ecuación 8:

$$\% \text{ de cristalinidad} = (\text{área cristalina} / \text{área total}) \times 100 \quad (\text{Ec. 8})$$

Los picos de los difractogramas se integraron con el software Origin® 8.0 (OriginLab Co., Massachusetts, EE. UU.), tomando el intervalo de  $2\theta = 10\text{--}35^\circ$ .

## 2.10. Morfología de superficie de película por SEM

De acuerdo con Hernández-Centeno *et al.* (2020), se emplearon muestras de material de  $1 \times 2 \text{ cm}$  por tratamiento. Las micrográficas de la superficie se alcanzaron mediante observación directa, sin aplicar ningún tratamiento previo a

las muestras, utilizando un microscopio electrónico de barrido Jeol™ (modelo JMS-70000S, Jeol Ltd., Tokio, Japón) con un aumento de 500× y una tensión de 5 kV.

### **2.11. Análisis estadístico**

Se implementó un modelo experimental completamente al azar, conforme a lo especificado en el Cuadro 1. Todos los resultados obtenidos se evaluaron mediante un ANDEVA de una sola vía, aplicando la prueba LSD de Fisher ( $p \leq 0.05$ ) para determinar diferencias significativas entre medias.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Obtención de almidón nativo de raíz de calabacilla loca y microfibra de lechuguilla

Se logró extraer almidón a partir de la materia prima fresca (raíces de *C. foetidissima* Kunth) con un rendimiento del 32%, valor comparable al reportado por Hernández-Centeno et al. (2020). De acuerdo con los autores, el contenido de almidón en las raíces de esta especie puede alcanzar hasta un 52 % en base seca, dependiendo de la época de recolección del material biológico.

#### 3.2. Acetilación del almidón nativo

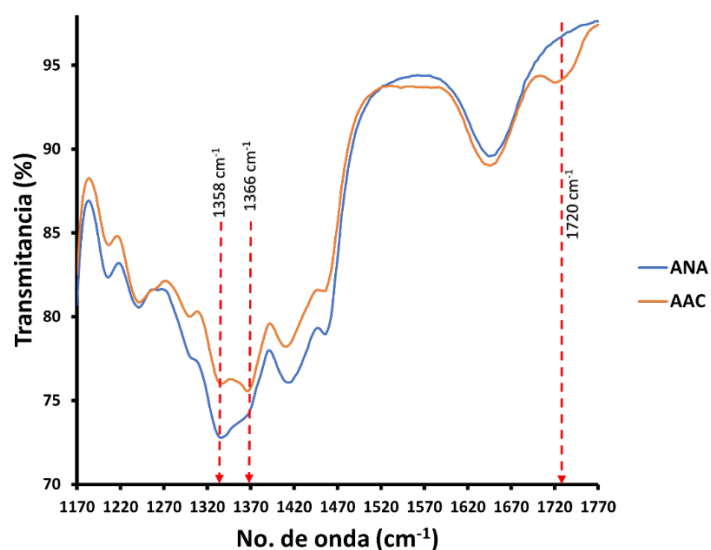


Figura 2. Espectrogramas de almidón nativo y acetilado de calabacilla loca acotados al intervalo de no. de onda de 1170 a 1770  $\text{cm}^{-1}$ .

El espectrograma IR (Fig. 6), el almidón modificado mostró señales de estiramiento correspondiente al enlace C – O del grupo acetilo lo cual ha sido reportado por Molina *et al.* (2019), quienes ubicaron la presencia de la banda de absorción en el rango 1358 – 1366  $\text{cm}^{-1}$  confirmando la aparición de grupos acetilo en el almidón.

Además, se observó un incremento alrededor de la banda 1700-1750  $\text{cm}^{-1}$  en el almidón acetilado respecto al almidón nativo. Esta banda es una particularidad para el almidón acetilado y corresponde con lo descrito por Prieto-Méndez *et al.*, (2010), donde reportaron un resultado similar para almidón de plátano acetilado y muestran las mismas variaciones en el espectrograma IR, donde las señales se hacen mayores respecto al incremento en el tiempo en que se lleva a cabo la reacción. Molina *et al.*, (2019) reportaron resultados similares, ya que en su estudio esta banda también se hizo presente.

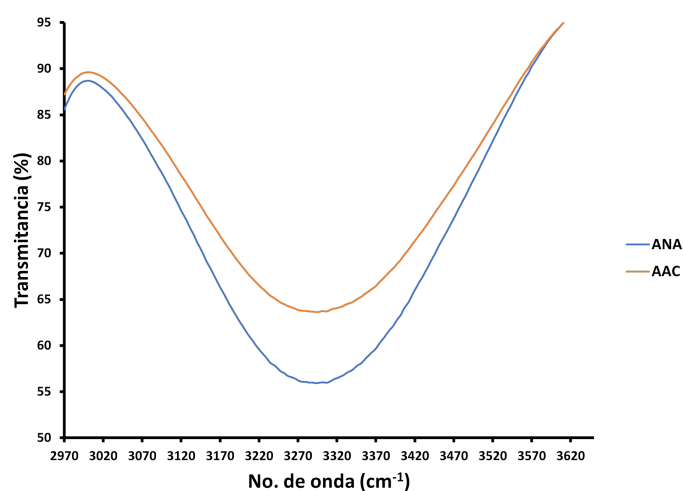


Figura 3. Espectrogramas de almidón nativo y acetilado de cabacilla loca acotada al intervalo de no. onda de 2970 a 3670  $\text{cm}^{-1}$ .

En la Figura 7 se puede observar un acortamiento en el estiramiento o tensión entre las bandas 3270 – 3420  $\text{cm}^{-1}$  donde estas son correspondientes a los grupos -OH. Se observa como la banda del almidón acetilado presentó una reducción en la intensidad con respecto al nativo, Este efecto puede deberse a la incorporación de grupos acetilo en la estructura molecular del almidón., corroborando que la modificación se efectuó. (Molina 2019) reportó el mismo comportamiento en estas bandas y en el estudio de (Halal *et al.*, 2015) se hace presente la banda alrededor de los 3000 - 3600  $\text{cm}^{-1}$ .

### 3.2.1. Grados de sustitución (GS) y Porcentaje de acetilación (%GA)

Este parámetro constituye la principal herramienta para la evaluación estructural de los almidones acetilados y se refiere al grado de reemplazamiento de los grupos hidroxilo presentes en las unidades de glucosa por grupos acetilo. Los valores de grado de reemplazamiento obtenidos en un almidón son directamente proporcionales a la cantidad de reactivo utilizado. (Prieto-Méndez, 2010).

Los valores de grado de sustitución del almidón de calabacilla loca, modificado químicamente y determinados mediante el método de Trela (2018) / Xu, Miladinov, *et al.*, (2004) se reportan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Grados de sustitución y porcentaje de grupos acetilo de almidones de raíz de calabacilla loca acetilados por el método Trela (2018) / Xu, Miladinov & Hanna (2004).

Ensayo	GS	% GA
1H-1R	0.021	2.22
1H-2R	0.023	2.65
1H-3R	0.020	2.13

(Elaboración propia)

El almidón modificado presentó un grado de sustitución de 0.021 y un contenido de acetilación de 2.33 %. Este resultado se encuentra dentro de los parámetros establecidos por la normativa vigente para aditivos alimentarios, dado que el CAA autoriza hasta un 2.5 % de grupos acetilo en almidones acetilados. (Trela *et al.*, 2018).

Los valores de este trabajo coincidieron con los descritos por Osundahunsi *et al.* (2014), quienes utilizaron distintas concentraciones de anhídrido acético para producir almidón de mandioca (*Manihot esculentum* Crantz) acetilado, obteniendo grados de sustitución (GS) en el intervalo de 0.034 a 0.213. Asimismo, dichos investigadores analizaron la influencia del origen botánico del almidón mediante dos cultivares diferentes de mandioca, demostrando que el tipo

de variedad incide en el grado de sustitución.”.

Por otra parte, Mbougoung et al. (2012) evaluaron la acetilación de almidón de papa y mandioca conservando el proceso de reacción durante 10 y 20 minutos. Los resultados indicaron que después de 10 minutos no existieron diferencias en GS entre ambos almidones, mientras que a los 20 minutos se registró diferencia significativa, siendo mayores en el almidón de papa, atribuibles principalmente las dimensiones y fragilidad de los gránulos.

De manera similar, Sodhi y Singh (2005) modificaron almidón de arroz de cinco cultivos, obteniendo porcentajes de acetilación (GA%) entre 2.26 y 3.68 %, equivalentes a GS entre 0.087 y 0.144, estos contrastes se atribuyeron a la variabilidad entre los cultivos, al contenido de amilosa, a la estructura y disposición de los gránulos, así como al empaquetamiento de las cadenas de amilosa en las regiones amorfas.”

### 3.3. Formulación de películas



Figura 4. Película obtenida a partir de almidón modificado y 0.25% de microfibras de lechuguilla (*A. lechuguilla* Torr.). Obtenida sobre un fondo de placa de acero inoxidable.

Se obtuvieron un total de 40 películas, como la que se puede observar en la Figura 8, esto de acuerdo con lo descrito anteriormente en el Cuadro 1.

Mediante observación directa, los materiales se observaron más opacos a medida que el porcentaje de microfibras en la matriz polimérica aumentaba, al igual que una sensación de “acartonamiento” al tacto. De igual manera las películas con almidón modificado resultaron más elásticas al tacto y menos opacas con respecto a las nativas.

### **3.4. Caracterización morfológica por SEM**

El objetivo de este estudio fue poder observar la morfología y estructura superficial de las películas elaboradas con un nivel de detalle mucho mayor y más nítido. Se observó la textura, rugosidades, poros y grietas en los diferentes tratamientos tanto nativos como acetilados.

Se pudo observar la compatibilidad almidón-celulosa, este estudio permitió observar la adecuada integración de los materiales. Fue posible visualizar también las fibras de microcelulosa de lechuguilla entre la matriz polimérica.

De igual manera, se apreció cómo la acetilación cambió la estructura del almidón, cómo se dispersó la celulosa y la porosidad o el reblandecimiento en la microestructura de los materiales poliméricos biobasados que se formularon.

La rugosidad observada en las películas de algunos tratamientos pudiera sugerir la incompatibilidad parcial entre los materiales de utilizados en la formulación de las soluciones filmogénicas, esto pudo haberse originado debido al uso del almidón modificado, ya que la acetilación reduce la hidrofilia del almidón (Agudelo-Zamudio, 2023), lo que pudo haber alterado su compatibilidad con la microfibras de lechuguilla, que es altamente hidrofílica, produciendo microdominios visibles en las micrografías de SEM.

De igual manera se pudo observar el efecto del plastificante, el cual tiende a reducir la rigidez del biomaterial, permitiendo una estructura más flexible, pero también promoviendo una superficie más irregular, esto pudo haber contribuido a la formación de poros o microfracturas.

A partir de los resultados, se observó que las fibras no están bien distribuidas o muestran una separación de la matriz, esto puede indicar poca dispersión o falta de compatibilidad con el almidón acetilado. Las cavidades o vacíos visibles entre fases podrían indicar un desprendimiento de fibras, probablemente durante el secado, también pudiera indicar una falla en la adhesión a un nivel microestructural, posiblemente por diferencias en polaridad o por insuficiente mezclado durante el proceso de obtención (Halal *et al.*, 2015).

En cuanto al “acartonamiento” que se sintió al tacto, puede deberse a una integración de la microcelulosa y el almidón termoplastificado, pues al utilizar tanto almidón nativo como el modificado fue posible observar a simple vista las fibras tanto en la superficie como en el interior de los materiales formulados, recubiertas por el almidón termoplastificado. Así mismo, la presencia de la fibra se visualizó de manera progresiva en cada uno de los tratamientos.

En la Figura 9 se reportan las películas realizadas con almidón no convencional modificado por acetilación. La película testigo (T0n) mostró una superficie lisa y homogénea que indica una matriz uniforme, correspondiente a una matriz polimérica sin refuerzo. Del tratamiento T1n a T4n comenzó a hacerse más notoria la adición del agente reforzante, observándose una mayor interacción matriz - refuerzo, indicando una buena compatibilidad. Se visualizó una distribución adecuada del agente reforzante aunque, a su vez, se presentaron aglomerados discretos y una superficie rugosa con respecto a T0n.

A partir de tratamiento T5n a T7n las películas mostraron superficies más irregulares y con estructuras fibrosas más prominentes, esto se atribuyó al aumento en el porcentaje de microcelulosa, ya que las fibras se hicieron presentes en aglomerados más grandes.

De manera concordante, El Halal *et al.* (2017) y Santana *et al.* (2018), reportaron una organización heterogénea de las fibras de celulosa en los materiales que desarrollados.

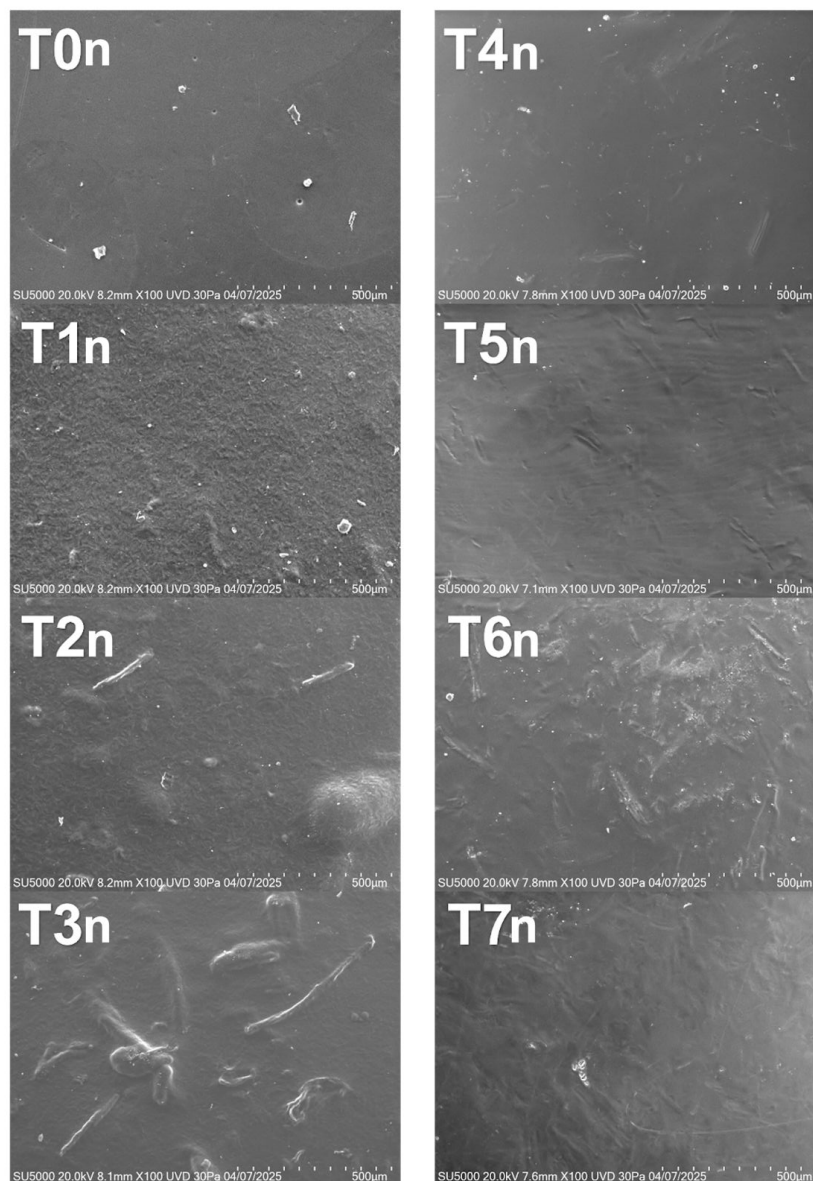


Figura 5. Micrografías de películas en orden % de concentración de microfibra de lechuguilla con almidón nativo de raíz de calabacilla loca, obtenidas mediante SEM a 510 X.

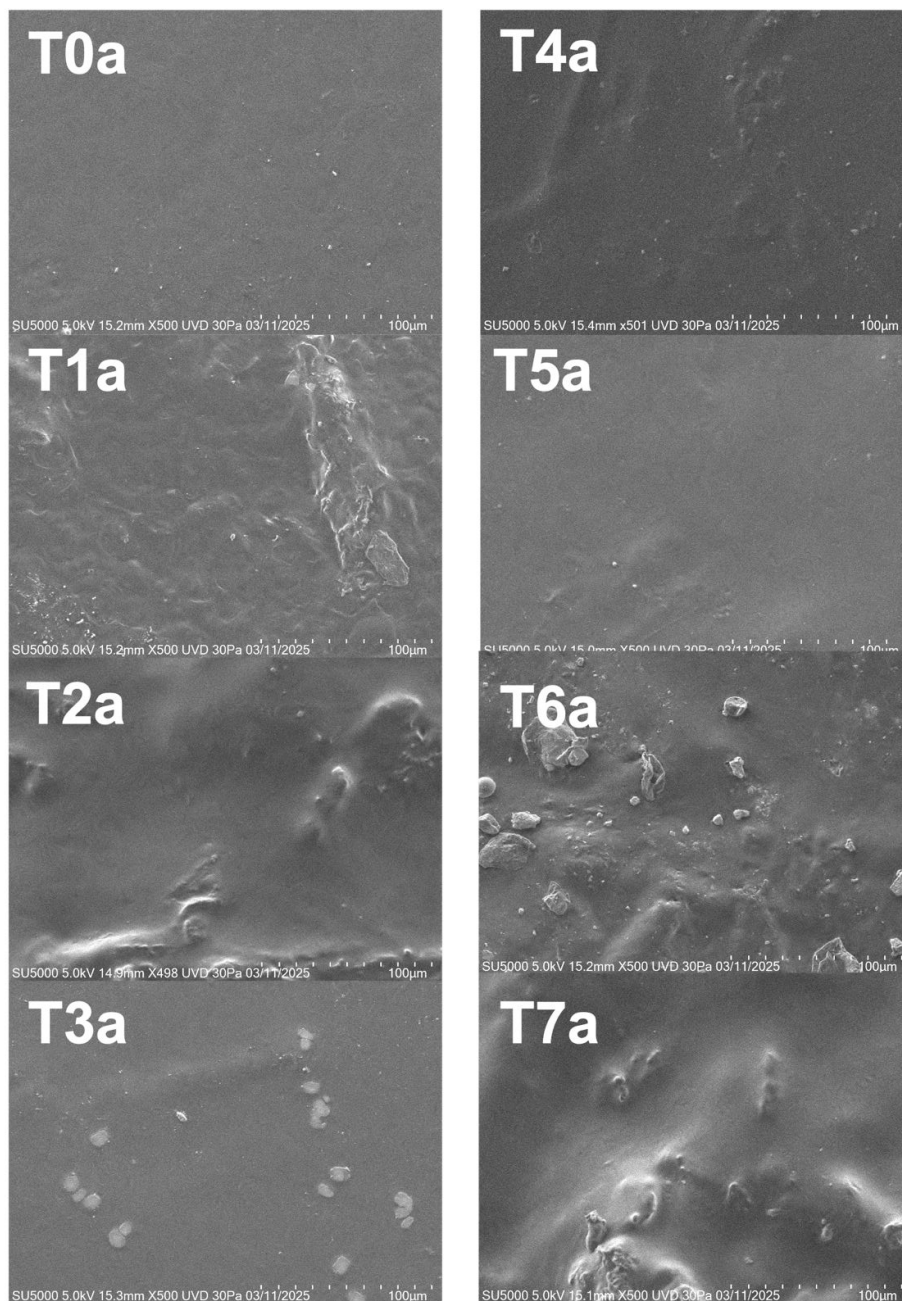


Figura 6. Micrografías de películas en orden % de concentración de microfibras de lechuguilla con almidón acetilado de raíz de calabacilla loca, obtenidas mediante SEM a 510 X.

Por otro lado, en la Figura 10 las micrografías SEM de las películas obtenidas con almidón acetilado y distintos niveles de concentración de microfibras (T0a – T7a) mostraron una evolución clara en la morfología superficial conforme aumenta la carga de fibra. Se pudo observar en T0a una superficie homogénea

y lisa, característica de una matriz sin refuerzos. A partir de T1a y T2a, se observaron estructuras fibrilares y un incremento en la rugosidad, lo que sugiere una integración inicial de las fibras. En contraste, T4a y T5a presentaron superficies más lisas, lo que podría indicar una redistribución más uniforme o menor interacción con la matriz. Finalmente, T7a reveló una morfología rugosa y con cúmulos, lo cual puede comprometer la integridad del material.

Los resultados concuerdan con lo obtenido por Zhou et al. (2020), quienes observaron que la adición de fibras vegetales mejora inicialmente la resistencia y cohesión de biopelículas, pero concentraciones elevadas provocan aglomeración y defectos estructurales. De forma similar, Jiménez et al. (2012) demostraron que una dispersión inadecuada de fibras en matrices de almidón genera heterogeneidad y afecta negativamente las propiedades mecánicas y barrera.

### **3.5. Propiedades ópticas**

#### **3.5.1. Luminosidad**

Para la determinación del color, se analizó inicialmente la luminosidad  $L^*$  de las películas formuladas (Fig. 11), la cual se vio influenciada por la incorporación de microfibras en ambos tipos de almidón. Se observó que las películas formuladas con almidón nativo presentaron mayor luminosidad, destacando el tratamiento con 0.05 % de microfibra, que exhibió el valor más alto para este parámetro. Para las películas de almidón modificado se pudo observar que a partir del tratamiento 0.25 a 1.00 % de microfibra no se detectó diferencia significativa, sin importar el incremento de microfibra en su composición.

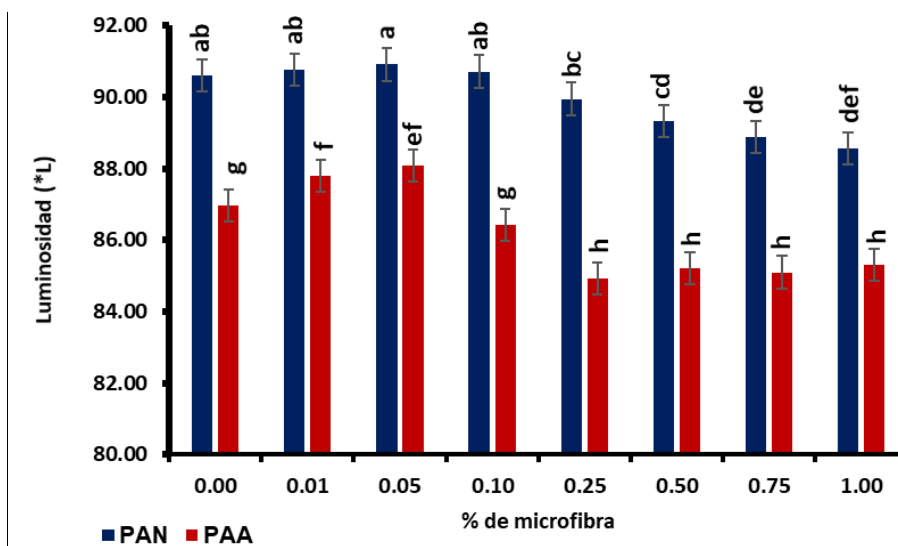


Figura 7. Luminosidad ( $L^*$ ) de las películas-almidón nativo y películas-almidón modificado obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según LSD de Fisher ( $P \leq 0.05$ ).

El decremento de la luminosidad en los T13 0.25 a T16 1.00 % de microfibras para las películas formuladas a base de almidón modificado, la reducción de luminosidad podría explicarse por la absorción de luz asociada a la opacidad incrementada, resultante de una rugosidad más acentuada debido al aumento de la concentración de microfibras en la matriz polimérica (Yoplac, 2021). Por otro lado, los valores crecientes de los materiales desarrollados a partir de almidón nativo pudieron ser ocasionados por una mejor integración de microfibras en la matriz de las películas, pues esto pudo favorecer una mayor reflectancia de la luz en las películas formuladas de almidón nativo respecto al modificado.

### 3.5.2. Índice de amarillamiento ( $YI$ )

El índice de amarillamiento ofrece una estimación del efecto que tiene la incorporación de microfibras en el material, considerando la apreciación del consumidor sobre estos materiales. En los valores reportados en la Figura 12 se puede analizar cómo este parámetro incrementó su valor ante la presencia de microfibras de lechuguilla en los materiales formulados, siendo las películas a partir de almidón nativo las que tendieron a ser más amarillas con respecto a las

elaboradas a partir de almidón modificado, presentando cambios significativos entre tratamientos, lo cual resulta correspondiente con los resultados de Salazar-Palma (2020), quienes reportaron que la concentración de su agente de refuerzo fue proporcional al índice de amarillamiento que se presentó en sus películas.

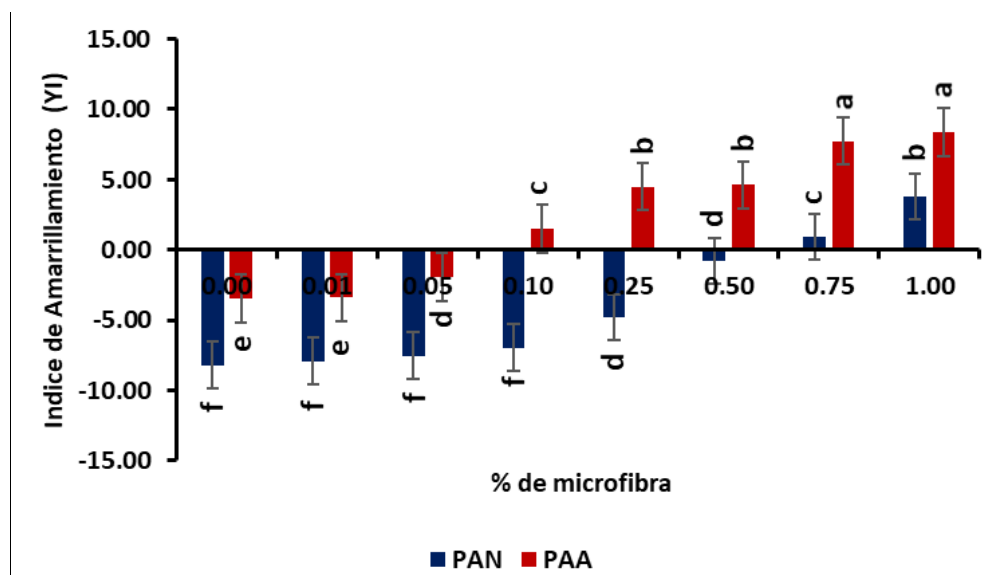


Figura 8. Índice de amarillamiento (YI) de las películas-almidón nativo y películas-almidón modificado obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según LSD de Fisher ( $P \leq 0.05$ ).

### 3.5.3. Opacidad

Este parámetro abona en la manera en cómo puede percibirse el material por el usuario final y, a su vez, puede brindar elementos en la decisión sobre la aplicación de este tipo de materiales. En la Figura 13 se observa los valores obtenidos.

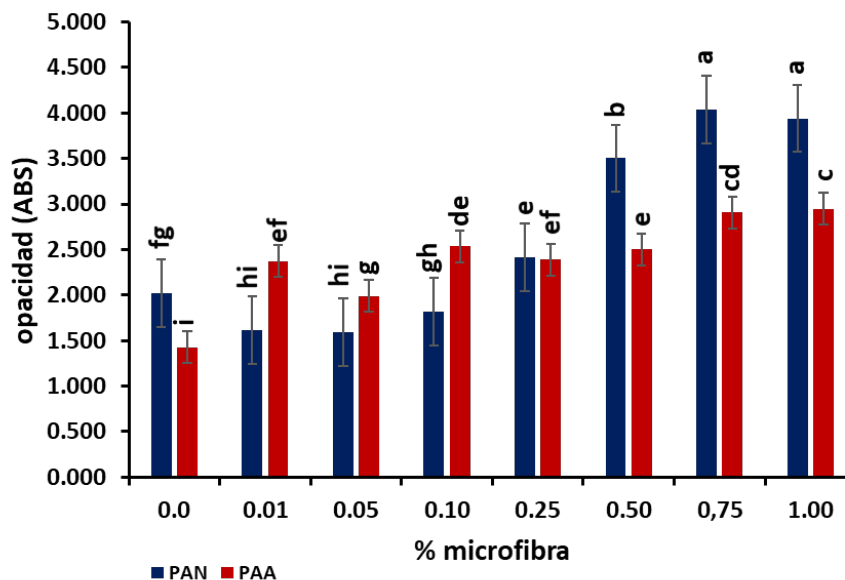


Figura 9. Opacidad de las películas-almidón nativo y películas-almidón modificado obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según LSD de Fisher ( $P \leq 0.05$ ).

Se observó que los materiales elaborados de almidón nativo exhibieron una mayor opacidad en comparación con aquellas elaboradas con almidón acetilado. Asimismo, se muestra que la opacidad de las películas aumentó de manera proporcional al incremento de microfibra en la matriz polimérica. Los tratamientos con concentraciones de 0.01 a 0.10 % de microfibra en películas de almidón nativo mostraron valores inferiores, lo que podría relacionarse con la disposición de la matriz polimérica y la ubicación de las microfibras en la superficie del material. La opacidad de las películas de almidón nativo también pudiera atribuirse al agua que queda dentro entre el material, esto debido a la higroscopicidad de los componentes (almidón nativo, microfibra y glicerol), los cuales aportan mayor hidrofiliidad en su conjunto (Muñoz *et al.*, 2014).

Estos resultados se pueden correlacionar con los valores del índice de amarillamiento ya que, al igual que los materiales elaborados a partir de almidón nativo, las películas de almidón modificado mostraron una tendencia al

amarillamiento y a la opacidad. Salazar-Palma (2020) reportó una tendencia similar al agregar su agente de refuerzo.

En el estudio de Navarrete-Tumbaco *et al.* (2023) igualmente se presentaron resultados similares respecto a la opacidad en los materiales formulados con almidón modificado de aguacate, esto se debe a que obtuvieron más claridad en la pasta y relacionaron esta variable con la capacidad que tiene para transmitir la luz.

### 3.6. Grosor

El grosor constituye uno de los parámetros más relevantes, dado que se emplea en el cálculo de las propiedades mecánicas y proporciona información sobre la incorporación de humedad y la disposición de las microfibras dentro de la matriz polimérica de cada película formulada. La Figura 14 reporta los valores obtenidos para este análisis.

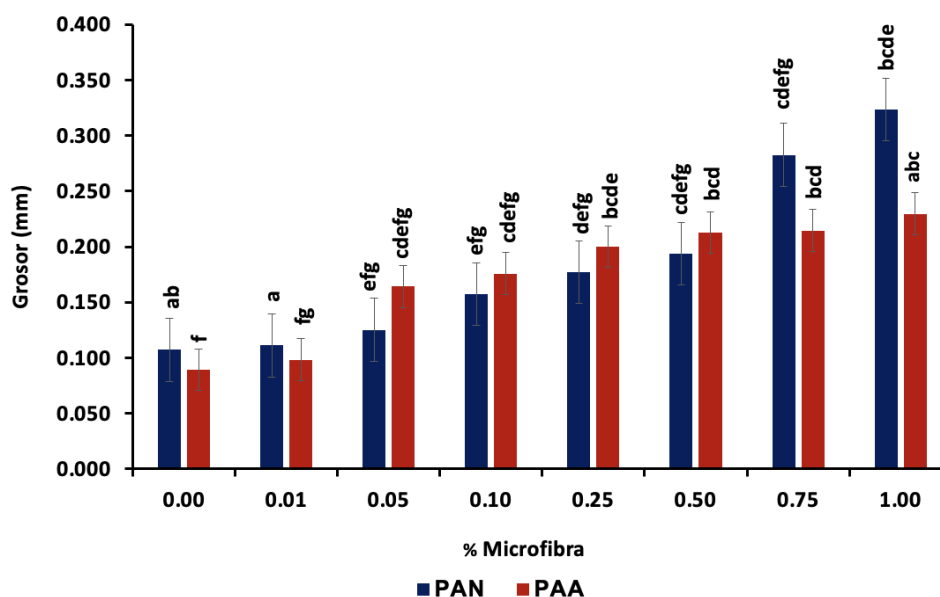


Figura 10. Grosor de las películas-almidón nativo y películas-almidón modificado obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según LSD de Fisher ( $P \leq 0.05$ ).

Se pudo observar que la presencia de microfibras de lechuguilla afectó directamente el grosor de las películas, comportamiento similar al de las membranas formuladas a partir de almidón acetilado, a excepción del tratamiento testigo (0.0%) y el de 0.01% de microfibras.

Los tratamientos con un porcentaje mayor de microfibras (0.75 y 1.00 %) se muestran más gruesas, Esto podría atribuirse al volumen adicional que proporciona la microfibras en las películas, generando un abultamiento debido a la reducida solubilidad de las fibras y la mayor estabilidad de su estructura molecular más estable frente con la de los almidones.

De acuerdo con lo estudiado por Halal et al. (2017), en su trabajo también se observó un aumento de este parámetro al emplear almidón de papa y de yuca, utilizando además celulosa como refuerzo. Sus resultados parecen no estar afectados por el origen botánico del almidón, sino más bien a la presencia del agente de reforzante que emplearon. Otro resultado semejante fue el reportado por Santana *et al.* (2018).

Según lo descrito por Navarrete-Tumbaco *et al.* (2023) se indicó que las diferencias en sus películas elaboradas con almidón nativo y almidón modificado puede deberse al tipo y concentración del plastificante utilizado, lo que puede afectar el espesor de las películas.

### **3.7. Solubilidad**

Su relevancia radica en que proporciona información sobre el grado de degradabilidad del material formulado, así como sobre las posibles aplicaciones de uso. Los resultados, presentados en la Figura 15, corresponden a películas elaboradas con almidón acetilado, las cuales mostraron porcentajes de solubilidad significativamente superiores en comparación con las membranas basadas en almidón nativo

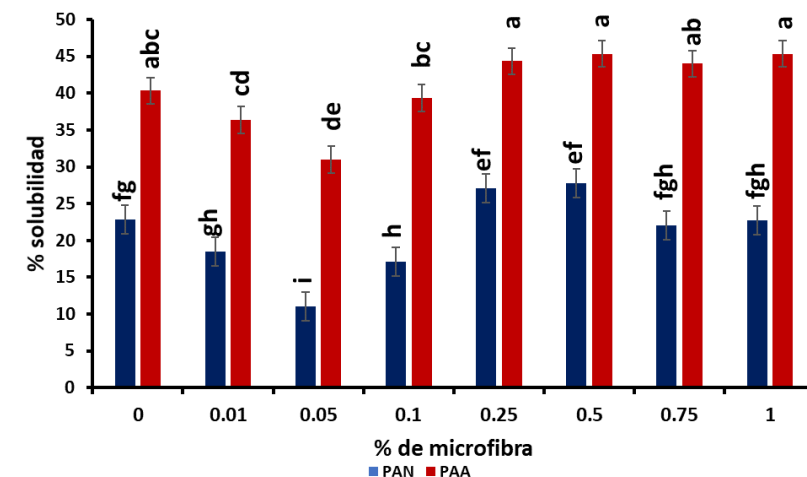


Figura 11. Solubilidad de las películas-almidón nativo y películas-almidón modificado obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según LSD de Fisher ( $P \leq 0.05$ ).

Los tratamientos 0.25 a 1.00 % resultaron más heterogéneos, con valores mayores, esto pudiera ser atribuido al acomodo en la matriz polimérica. El resto de los tratamientos, de almidón nativo y almidón modificado, resultaron con pocas diferencias perceptibles respecto al testigo.

Un menor porcentaje de solubilidad podría indicar una interacción molecular más estable entre los constituyentes de los materiales, lo que puede hacer que la degradación del material sea más tardía en condiciones ambientales (González-López et al., 2023).

Halal *et al.* (2017) reportaron resultados similares: un incremento en la solubilidad donde se empleo películas de almidón de papa usando como agente reforzante celulosa, respecto al testigo. Por otro lado, Tongdeesoontorn *et al.* (2011), obtuvieron valores de solubilidad inversamente relacionados a la presencia de carboximetilcelulosa (CMC), la cual utilizaron como agente reforzante en la elaboración de películas de almidón de yuca.

A su vez, en el estudio realizado por (Navarrete-Tumbaco *et al.*, 2023) donde trabajaron almidón de aguacate acetilado, sus películas presentaron valores mayores de solubilidad con respecto a las elaboradas a base de almidón nativo,

y asociaron directamente al % de solubilidad presente en las películas con el tiempo de acetilación. A mayor tiempo, mayor fue el grado de sustitución con grupos acetilo, lo cual reduce la cohesión entre cadenas de almidón y facilita la interacción con el agua. Esta modificación genera una estructura más amorfa y dispersable, lo que explica el incremento en la solubilidad (Tang & Copeland, 2006).

Esto es una propiedad deseable, ya que aumenta las posibilidades de aplicación en sistemas alimentarios.

### **3.8. Caracterización por FTIR/ATR**

La caracterización mediante espectroscopía IR de las películas obtenidas permite permitir identificar la presencia de compuestos adicionales en la muestra, así como la formación de nuevos enlaces derivados de las interacciones entre los componentes durante el procesamiento y la preparación del material.

En todos los materiales se identificaron las bandas características del polisacárido predominante, correspondiente al almidón. En la Figura 16 y 17 se observan los espectros IR en los que se utilizó almidón nativo y acetilado de raíz calabacilla loca, respectivamente, acotado a las bandas 3000 - 3700  $\text{cm}^{-1}$ , Estas bandas se atribuyen a los grupos hidroxilo (-OH) presentes en las unidades de glucosa que constituyen las cadenas de amilosa y amilopectina. Se observó que estas bandas presentaron menor intensidad en los tratamientos en los que se empleó almidón acetilado (Fig. 19), debido probablemente a la presencia del grupo acetilo. Molina (2019), reportaron resultados similares para el almidón de papa nativo y modificado, presentando estas mismas bandas en su estudio, de igual manera con una disminución y un acortamiento en dichas bandas debido a la adaptación química a la cual fue sometido el almidón.

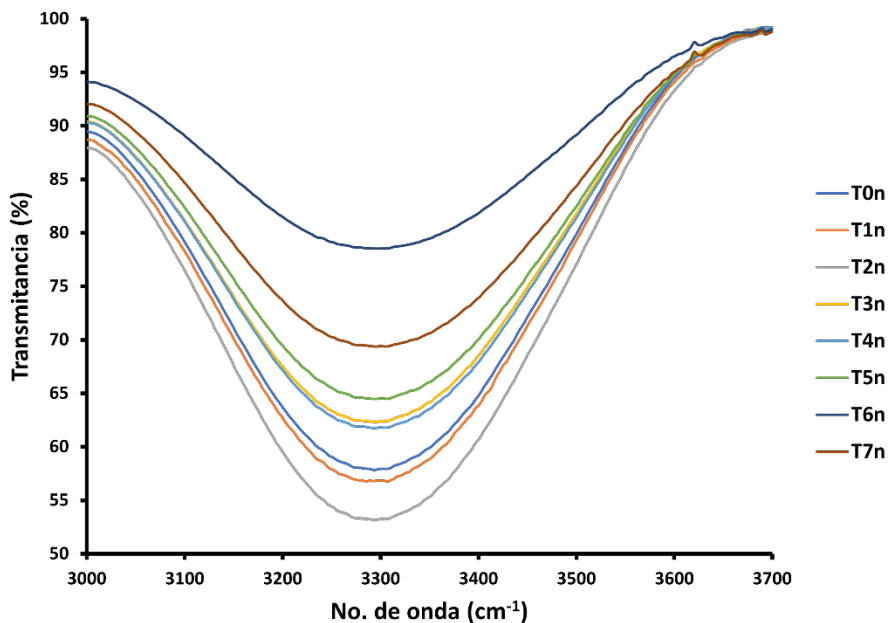


Figura 12. Espectrograma IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde se utilizó almidón de calabacilla loca nativo, acotado a las bandas entre 3000 y 3700  $\text{cm}^{-1}$ .

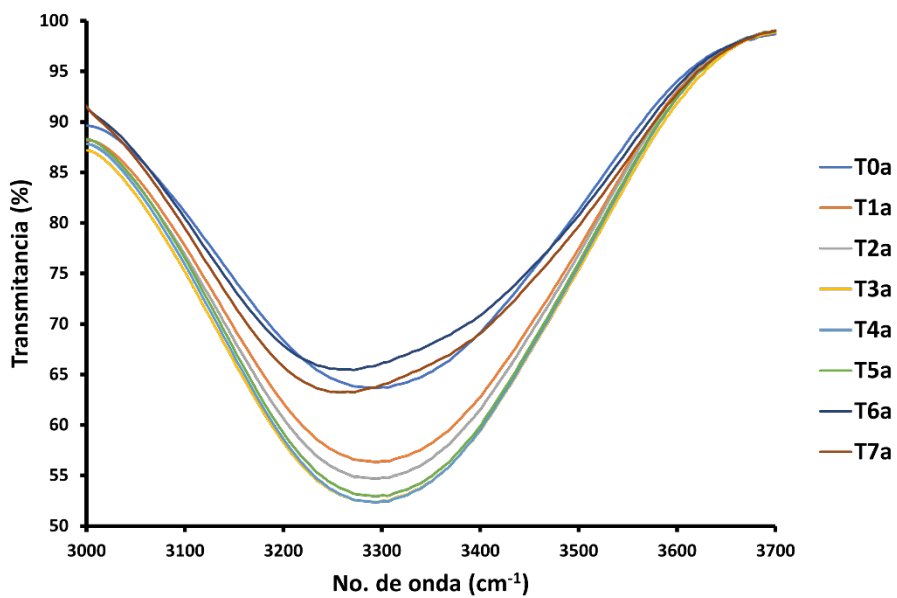


Figura 137. Espectrograma IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde se utilizó almidón de calabacilla loca acetilado, acotado a las bandas entre 3000 y 3700  $\text{cm}^{-1}$ .

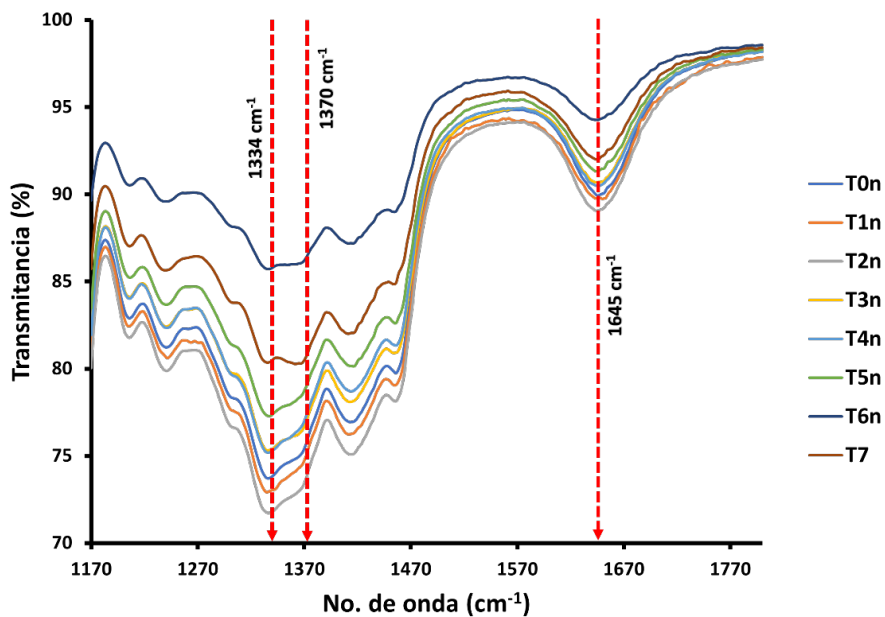


Figura 14. Espectrograma IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde se utilizó almidón de calabacilla loca nativo, acotado a las bandas entre 1170 y 1800  $\text{cm}^{-1}$ .

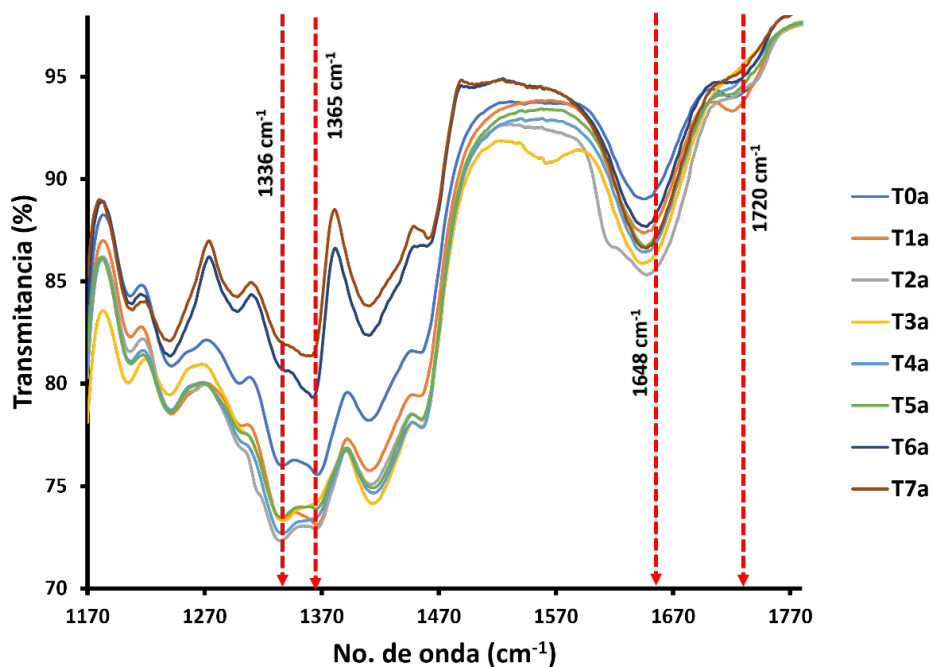


Figura 19. Espectrograma IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde se utilizó almidón de calabacilla loca acetilado, acotado a las bandas entre 1170 y 1800  $\text{cm}^{-1}$ .

Para ambas series de tratamientos, Figuras 18 y 19, fue posible observar la existencia de agua ligada a los  $1600\text{ cm}^{-1}$ , lo que coincide con lo descrito por Balakrishnan *et al.* (2017). Asimismo, se observó un incremento alrededor de la banda  $1700\text{-}1750\text{ cm}^{-1}$  (Figura 20). Esta banda es correspondiente a la vibración del grupo carboxilato ( $-\text{COO}-$ ) para el almidón modificado y corresponde con el reporte de Balakrishnan *et al.* (2017).) donde ellos reportan almidón de plátano acetilado y muestran las mismas bandas típicas en su estudio. De igual manera, Molina (2019) en su estudio con almidón de papa reportó evidencias similares en sus tratamientos nativo y acetilado, en donde se hicieron presentes estas bandas.

En los IR se muestra la aparición de las bandas  $1334 - 1370\text{ cm}^{-1}$  las cuales pudieran ser atribuidas a las vibraciones simétricas de los grupos  $-\text{CH}_3$  y al estiramiento del enlace C-O; además, como se aprecia en los resultados de los tratamientos de almidón nativo en la Figura 18 como se presentaron bandas más pronunciadas con respecto a las obtenidas en los tratamientos de almidón acetilado (Figura 19), esto se debe al cambio químico en la molécula de almidón. En el estudio realizado por Prieto-Mendez (2010) donde trabajaron con almidón de cebada reportó que se hace presente aproximadamente a  $1255\text{ cm}^{-1}$  correspondiente de manera específica a la elongación del enlace C-O de los grupos acetilo ellos a su vez reportaron que esta señal está relacionada con el aumento en los GS. Guerra *et al.* (2008) reportaron estas bandas en  $1226\text{ cm}^{-1}$  para almidón de plátano modificado. Se puede indicar que dicha banda se encuentra aproximadamente en el rango de  $1226$  a  $1334\text{ cm}^{-1}$ , donde se observan ligeros desplazamientos hacia mayores números de onda durante la reacción de acetilación del almidón.

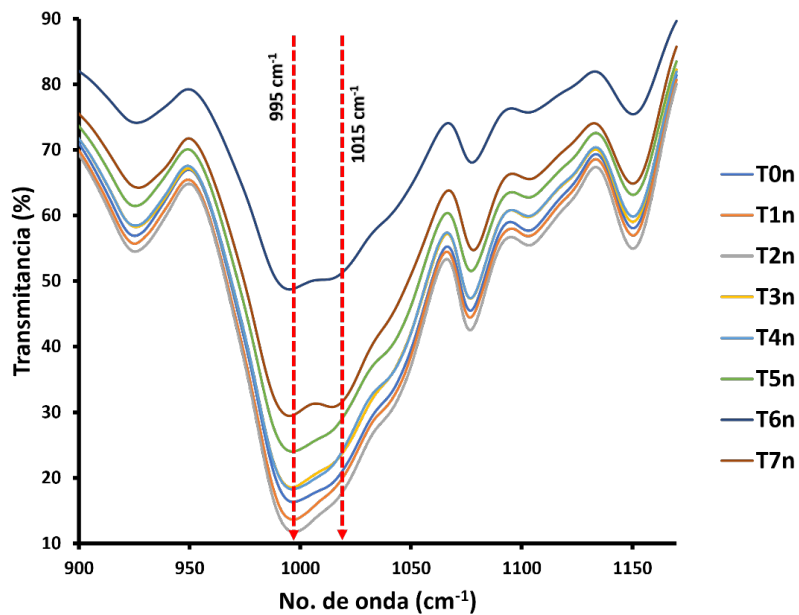


Figura 20. Espectrograma IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde se utilizó almidón de calabacilla loca nativo, acotado a las bandas entre 900 y 1170 cm<sup>-1</sup>.

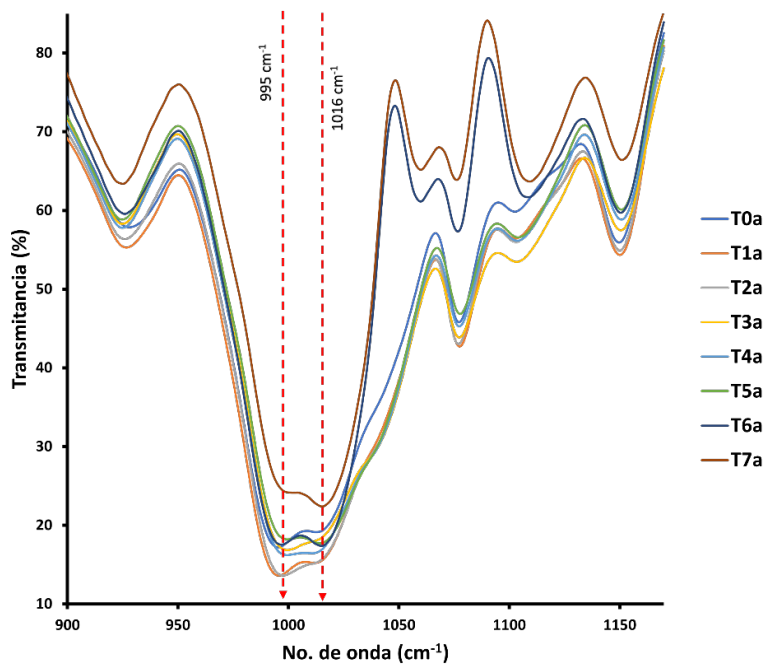


Figura 15. Espectrograma IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde se utilizó almidón de calabacilla loca acetilado, acotado a las bandas entre 900 y 1170 cm<sup>-1</sup>.

En las Figuras 20 y 21 se evidenciaron, alrededor de  $1050\text{ cm}^{-1}$ , las bandas asociadas al enlace -O- de los anillos de glucosa. Posteriormente, en el rango de  $900\text{ a }450\text{ cm}^{-1}$ , se observa la región denominada “huella dactilar”, atribuible al anillo piranósico de la glucosa, que constituye un componente molecular tanto del almidón como de la celulosa. Asimismo, cerca del número de onda  $995\text{ cm}^{-1}$ , se detectó la banda asociada a la interacción almidón-agua, la cual presentó ligeras disminuciones, probablemente debido a la incorporación de microfibras de celulosa, en concordancia con lo descrito por Echeverri et al. (2011).

### 3.8.1. Índice de cristalinidad aparente

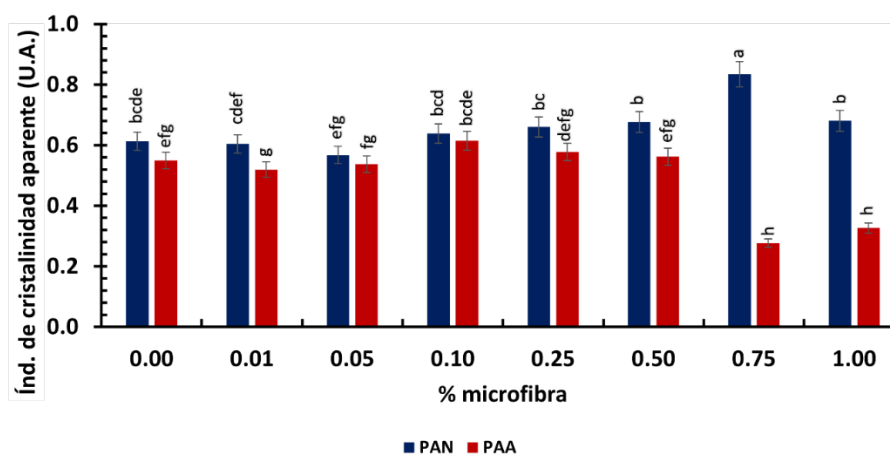


Figura 16. Valores de índice de cristalinidad aparente de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ( $P \leq 0.05$ ).

Este parámetro se determinó a partir del cociente de las intensidades de las bandas del espectro IR  $1047/1022\text{ cm}^{-1}$ , tras convertir la señal a unidades de absorbancia y realizar la deconvolución de los espectros. Este método facilita la evaluación de las alteraciones en la integridad estructural de un material basado en almidón y aporta información sobre los cambios en el orden molecular de las películas formuladas con almidón nativo y modificado empleados en este estudio. Los valores obtenidos se observan en la Figura 22.

Los resultados obtenidos para este parámetro evidencian una respuesta heterogénea, atribuible a las diferencias en la naturaleza química del almidón y a su interacción con la microfibrilla de lechuguilla. En los materiales formulados con almidón nativo, se identificó una modificación estructural más pronunciada a nivel molecular, especialmente en los tratamientos con mayores concentraciones de microfibrilla (0.75 % y 1.00 %). Esta tendencia puede deberse a la mayor disponibilidad de grupos hidroxilo en el almidón no modificado, que facilitan la presencia de enlaces de hidrógeno con los componentes lignocelulósicos de la fibra, promoviendo una matriz más organizada y rígida (Jiménez et al., 2012).

Por el contrario, las películas elaboradas con almidón acetilado presentaron valores notablemente más bajos bajo las mismas concentraciones de microfibrilla, lo cual sugiere una menor interacción entre fases. Este comportamiento puede explicarse a causa de la existencia de grupos acetilo en el almidón modificado, los cuales disminuyen la polaridad de la matriz y, por ende, reducen su interacción con los grupos funcionales presentes en la microfibrilla. Según Müller *et al.* (2009), este tipo de modificaciones puede afectar negativamente la compatibilidad interfacial, dificultando la formación de una red cohesiva entre matriz y refuerzo.

Adicionalmente, Bertuzzi *et al.* (2007) señalaron que los tratamientos químicos aplicados al almidón pueden alterar su grado de cristalinidad, reduciendo la capacidad de formar estructuras moleculares ordenadas, lo que explicaría la pérdida de organización observada en las películas modificadas, a pesar del aumento en la carga de microfibrilla.

En conjunto, estos resultados sugieren que el almidón utilizado es un factor crítico en el comportamiento estructural de la película elaborada. Mientras que el almidón nativo favorece interacciones más fuertes con la fibra, el almidón modificado limita dichas interacciones, probablemente debido a una menor compatibilidad química entre los componentes. Este comportamiento refuerza la importancia de considerar el diseño molecular de la matriz al desarrollar materiales compuestos con propiedades funcionales mejoradas.

### 3.8.2. Índice de afinidad al agua

Este índice ofrece información sobre la capacidad higroscópica de un material de base polisacárida y se calculó a partir del espectro IR, empleando las mismas condiciones utilizadas para determinar el índice de cristalinidad aparente, mediante el cociente de las alturas de las bandas  $1022/995\text{ cm}^{-1}$ . Los resultados se muestran en la Figura 23.

Los valores muestran una tendencia a la reducción de la afinidad al agua conforme aumenta el porcentaje de microfibras en las películas formuladas, lo cual coincide con hallazgos previos en los que la adición de fibras vegetales en matrices poliméricas ha demostrado mejorar la resistencia a la humedad debido a la barrera física que ofrecen (Espino-Pérez *et al.*, 2016; Azeredo *et al.*, 2009). En este caso, la integración de microfibras de lechuguilla podría generar un efecto análogo, disminuyendo la disponibilidad de sitios hidrofílicos en la matriz de almidón como consecuencia de las interacciones fisicoquímicas que ocurren entre las fibras y la matriz.

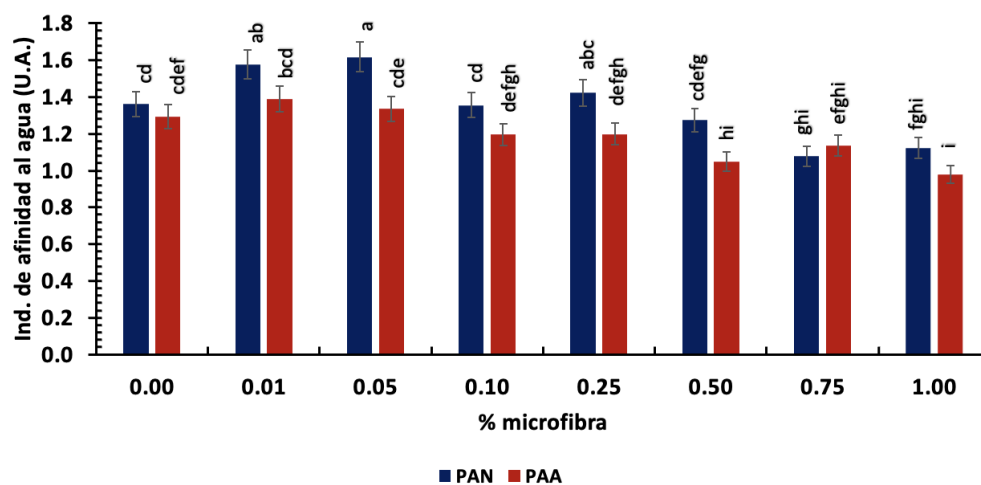


Figura 17. Valores de índice de afinidad al agua de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ( $P \leq 0.05$ ).

Además, se identificó que los materiales elaborados con almidón modificado presentaron una decreción en valores de afinidad al agua en comparación con aquellas formuladas con almidón nativo. Esto puede atribuirse a los cambios estructurales inducidos por la modificación del almidón, los cuales suelen disminuir la cantidad de grupos hidroxilo disponibles para la interacción con moléculas de agua (Zavareze & Dias, 2011). La modificación del almidón genera una estructura más ordenada o menos amorfa, lo que reduce su higroscopicidad y mejora sus propiedades de barrera.

Particularmente, el tratamiento con 1.00 % de microfibras y almidón modificado presentó el valor más bajo, lo que sugiere una sinergia entre la microfibras y la matriz modificada. Esta combinación parece favorecer un reacomodo molecular más compacto y menos susceptible a la absorción de agua, como también se ha reportado en sistemas similares de materiales compuestos biodegradables (Kowalczyk *et al.*, 2011; Souza *et al.*, 2020).

Por consiguiente, se puede deducir que la afinidad hacia el agua en las películas elaboradas se encuentra estrechamente vinculada con la estructura molecular del almidón y la integración de fibras vegetales. La higroscopicidad natural de la microfibras de lechuguilla, aunque significativa, podría verse contrarrestada por su función como elemento de refuerzo, promoviendo una barrera más efectiva al agua cuando se encuentra adecuadamente dispersa y adherida a una matriz modificada estructuralmente.

### **3.9. Difracción de rayos X**

La Figura 24 presenta los difractogramas de rayos X correspondientes a los tratamientos utilizados para la obtención de las películas.

Aunque se conservan los picos característicos de un almidón de tipo C ubicados alrededor de los ángulos  $2\theta$  17°, 19° y 22° correspondientes al proveniente de tubérculos, según lo referido por Hernández-Centeno *et al.* (2020), la intensidad en los mismos denunció cambios en las proporciones de cristalinidad de los materiales obtenidos utilizando almidón nativo en relación con el porcentaje de microfibras utilizado en su formulación, sobre todo en la señal a 22°, que ha sido

reportada como la más intensa para celulosa (Carrión-Prieto *et al.*, 2019), lo cual fue más notorio para los tratamientos de T4n a T7n.

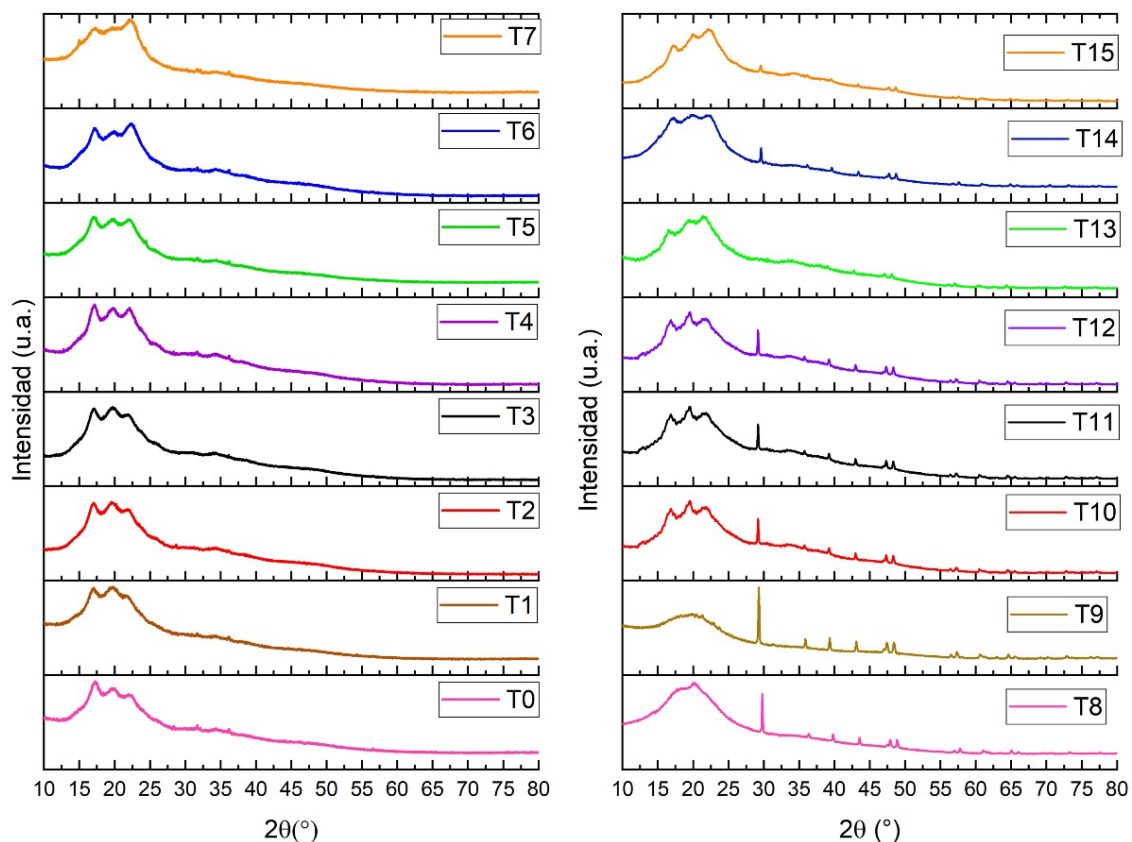


Figura 18. Difractogramas de rayos X de tratamientos donde se utilizó almidón nativo y acetilado en la formulación de películas.

Para los materiales con almidón acetilado, se evidenció la alteración de la estructura cristalina sobre todo en los materiales correspondientes a los tratamientos T0a y T1a al contar con 0 y 0.01% de microfibras, respectivamente. Esta pérdida de cristalinidad en almidones modificados por acetilación también ha sido estudiada por Torres-Becerril *et al.* (2015) y Sulbarán *et al.* (2018), quienes atribuyen esta alteración debido a los daños que sufre la estructura cristalina de los gránulos de almidón durante la acetilación. Por otro lado, Según Martínez *et al.* (2019), la modificación observada en la cristalización del almidón

acetilado es consecuencia de la acción de los grupos acetilo, los cuales interfieren en la reestructuración de la amilosa y la amilopectina durante el enfriamiento de los gránulos expuestos a altas temperaturas, generando una alteración en el patrón ordenado de la región cristalina presente en el almidón nativo.

A partir del T3a se advierte una recuperación de la estructura cristalina atribuida a la existencia creciente de microfibras de celulosa presente en la matriz biopolimérica, incrementándose la señal a los  $22^\circ$ , al igual que en los materiales donde se utilizó almidón nativo. En los difractogramas de estos materiales también se presentaron señales que no corresponden a los componentes principales de la matriz biopolimérica, mismas que pudieran ser atribuidas a restos de sales inorgánicas que se formaron durante el proceso de acetilación y que no pudieron ser eliminadas durante los lavados durante el mismo, como lo mencionan Jirón-García et al. (2022) en su estudio.

La Figura 25 muestra la cristalinidad aparente (%) de membranas elaboradas con almidón nativo y almidón acetilado, reforzadas con diferentes concentraciones de microcelulosa.

Para el T1, las películas elaboradas a partir de almidón acetilado presentaron el mayor valor observado, mientras que las nativas presentaron niveles más bajos. En concentraciones intermedias (T3-T6), las películas de almidón acetilado mantuvieron valores superiores respecto a las nativas. A partir de 0.75 % y 1 %, las diferencias entre formulaciones fueron menores, con valores en rangos más similares para ambas.

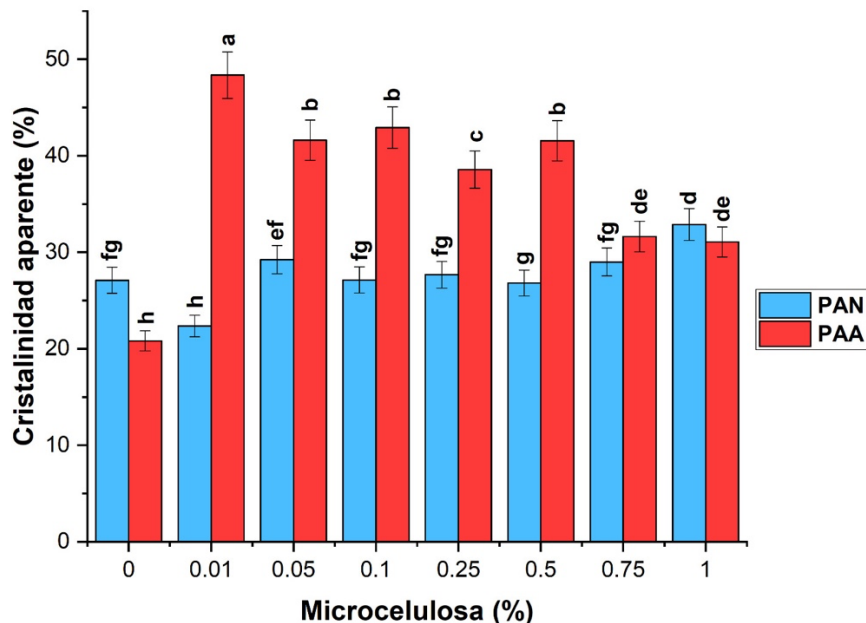


Figura 25. Cristalinidad aparente (%) obtenida a partir de los difractogramas de rayos X de las películas elaboradas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ( $P \leq 0.05$ ).

El análisis estadístico reveló la presencia de variaciones estadísticamente significativas entre los tratamientos y formulaciones, siendo el acetilado más cristalino que el nativo en la mayoría de los casos, excepto a 0.75% y 1.00% de microcelulosa donde las diferencias no fueron estadísticamente relevantes.

La tendencia observada sugiere que la adición de microcelulosa presenta un impacto dependiente de la concentración en la cristalinidad aparente. En las películas acetiladas una baja adición (0.01%) promueve un notable incremento en la cristalinidad, posiblemente debido a la función de la microcelulosa como agente nucleante que favorece la reorganización de cadenas de almidón durante el secado de la película (Apriyanto et al., 2022; Byshkov et al., 2020). Sin embargo, concentraciones más altas podrían generar una dispersión menos homogénea, incrementando zonas amorfas y reduciendo el ordenamiento (Espinosa et al., 2009).

En las formuladas a partir de almidón nativo, el incremento de cristalinidad con microcelulosa fue menos pronunciado, lo que podría atribuirse a que la estructura

más rígida del almidón nativo limita la movilidad de las cadenas para formar dominios cristalinos adicionales (Aguilar-Palazuelos et al., 2023).

El hecho de que las películas acetiladas presente valores de cristalinidad mayores que las nativas, podría deberse en la mayoría de los niveles de microcelulosa, esto contrasta con lo reportado en modificaciones químicas, donde normalmente se reduce la cristalinidad (Liu et al., 2022). Esto podría indicar que el proceso de acetado empleado no sólo no interrumpe la formación de cristales, sino que, en combinación con la microcelulosa, favorece la recristalización parcial del almidón durante la gelificación.

Esto concuerda con Sharma et al. (2021), donde estudiaron biopelículas de almidón reforzadas con fibras, la cristalinidad óptima no se obtiene en la máxima concentración de refuerzo, sino en niveles bajos, donde el balance entre la fase cristalina y amorfa maximiza el ordenamiento molecular.

### **3.10. Propiedades mecánicas**

Dentro de los criterios empleados para analizar materiales poliméricos, las propiedades mecánicas, de barrera y térmicas proporcionan información crucial sobre su desempeño y aplicaciones potenciales. En el presente estudio, se evaluaron la tensión a la fractura, el porcentaje de elongación y la permeabilidad al vapor de agua, cuyos datos se presentan seguidamente.

#### **3.10.1. Tensión a la fractura (TF)**

El objetivo de evaluar este parámetro consiste en cuantificar la fuerza total que resiste la película antes de romperse bajo tensión. Las películas evaluadas fueron reforzadas con microfibras de lechuguilla, se preve que, durante el proceso de formación, las fibras tienden a orientarse predominantemente en el plano de la película y en la dirección de flujo del material durante el moldeo o secado. Esta orientación de las fibras influye de manera significativa en las propiedades mecánicas, ya que permite que las fibras actúen como conductores de carga, transfiriendo tensiones a través de la matriz polimérica y disminuyendo la velocidad de propagación de fisuras. (Wang, J., et al., 1993) Por este motivo,

las pruebas mecánicas se realizaron en la dirección paralela a la orientación principal de las fibras, con el fin de evaluar el máximo potencial de refuerzo que estas pueden aportar. Este enfoque asegura que los resultados obtenidos reflejen el efecto real del alineamiento del refuerzo y su contribución a la resistencia del material. Los resultados obtenidos pueden observarse en la Figura 26.

Las películas elaboradas con almidón modificado presentan consistentemente valores mayores de TF con respecto a sus contrapartes de almidón nativo (Cavero, *et al.*, 2016).

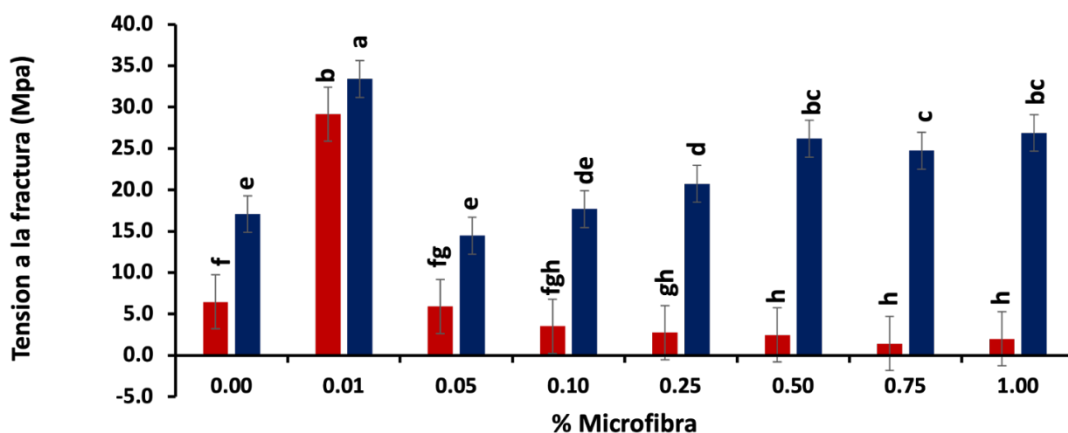


Figura 19. Tensión a la Fractura (TF) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ( $P \leq 0.05$ ).

El tratamiento 0.01% de microfibras destaca, mostrando el mayor valor de TF tanto para el almidón nativo como para el modificado, lo cual podría deberse al acomodo en la matriz polimérica (posiblemente plastificantes o agentes de refuerzo) que optimiza el desempeño mecánico. A partir de esa formulación, la TF de las películas con almidón nativo disminuye notablemente, mientras que las películas modificadas mantienen una resistencia elevada. Este comportamiento podría explicarse por una mejor cohesión entre las cadenas poliméricas y una menor densidad de defectos estructurales o zonas de estrés concentrado.

A partir del tratamiento 0.25 a 1.00 % de microfibras de lechuguilla en películas con almidón modificado no se presentaron valores más heterogéneos, esto pudo deberse al buen acomodo molecular en la matriz polimérica. Así mismo, se obtuvieron resultados sin cambios significativos con respecto a los obtenidos en películas a partir de almidón nativo (Yoplac, 2021).

En distintos estudios reportados, se observó que en membranas de almidón de yuca reforzadas con fibras de celulosa, los resultados de tensión a la fractura mostraron un comportamiento más heterogéneo en relación con el porcentaje de microfibras incorporadas (Müller et al., 2009). De manera similar, otros autores indicaron que existe una correlación directa entre los resultados de TF y la concentración de CMC (agente reforzante) en materiales de almidón de yuca (Tongdeesoontorn et al., 2011).

Asimismo, Navarrete-Tumbaco et al. (2023) reportaron que los valores obtenidos en las pruebas mecánicas fueron mayores para las membranas elaboradas con almidón nativo en comparación con aquellas formuladas con almidón modificado.

### 3.10.2. Porcentaje de elongación (%E)

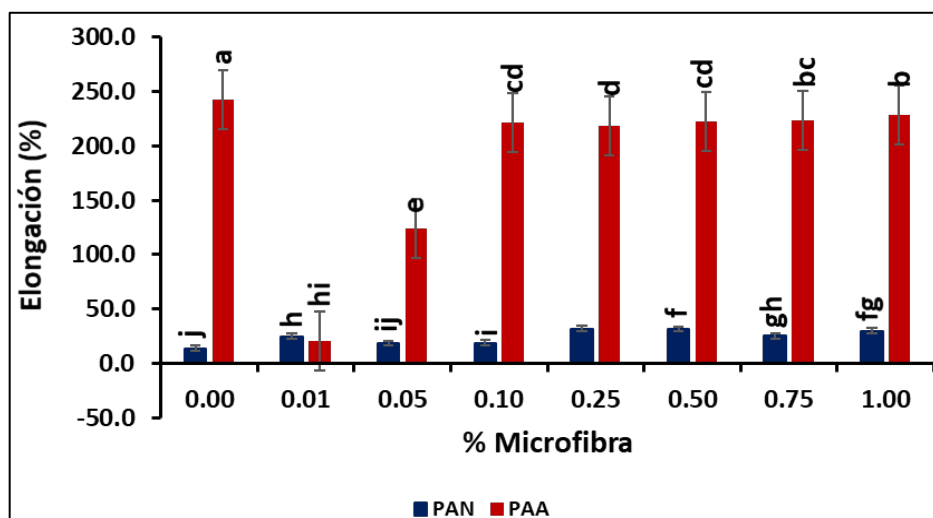


Figura 20. Porcentaje de Elongación (E%) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ( $P \leq 0.05$ ).

El porcentaje de elongación refleja la capacidad de un material para deformarse longitudinalmente respecto a sus dimensiones originales antes de romperse. Los valores correspondientes se observan en la Figura 27.

La elasticidad de los materiales evaluados mostró un incremento conforme aumentó el porcentaje de microfibras incorporadas en la formulación de las membranas de almidón nativo y acetilado de calabacilla. Se registró un comportamiento muy diferente en las películas formuladas con almidón modificado con respecto al nativo, obteniendo resultados de hasta el doble de las dimensiones originales de la película. De igual manera, a partir del tratamiento 0.10 a 1.00 % de microfibras se presentaron datos más heterogéneos, siendo el tratamiento testigo de almidón modificado (T0) el que presenta el valor más alto en este parámetro.

En su investigación, Müller *et al.* (2009) reportaron un comportamiento heterogéneo en este análisis, coincidiendo con los valores del presente estudio, en donde el incremento del porcentaje de microfibras de lechuguilla tendió a reducir los valores de % E en comparación con los testigos.

Por otro lado, Navarrete-Tumbaco *et al.*, (2023) obtuvieron valores mayores en las películas formuladas a partir de almidón modificado superando los valores para bioplásticos basados en almidón nativo de semilla de aguacate. En este sentido, los valores resultantes en su investigación demuestran la modificación del almidón utilizado, modificando positivamente las características mecánicas de la membrana biobasada en términos de elongación.

Por el contrario, Tongdeesoontorn *et al.* (2011) y Halal *et al.* (2017) reportaron una disminución marcada en porcentaje de elongación en sus materiales de papa y yuca reforzadas con respecto al porcentaje del agente reforzante empleado en sus materiales.

### **3.11. Permeabilidad al vapor de agua (PVA)**

El paso de moléculas de agua mediante los materiales constituye un factor relevante para valorar su desempeño como material de embalaje, dado que una

de las funciones principales es proteger el producto de la humedad y del ambiente, factores que podrían acelerar su deterioro. Los valores obtenidos de la permeabilidad al vapor de agua (PVA) para los materiales formulados en este trabajo se muestran en la Figura 28.

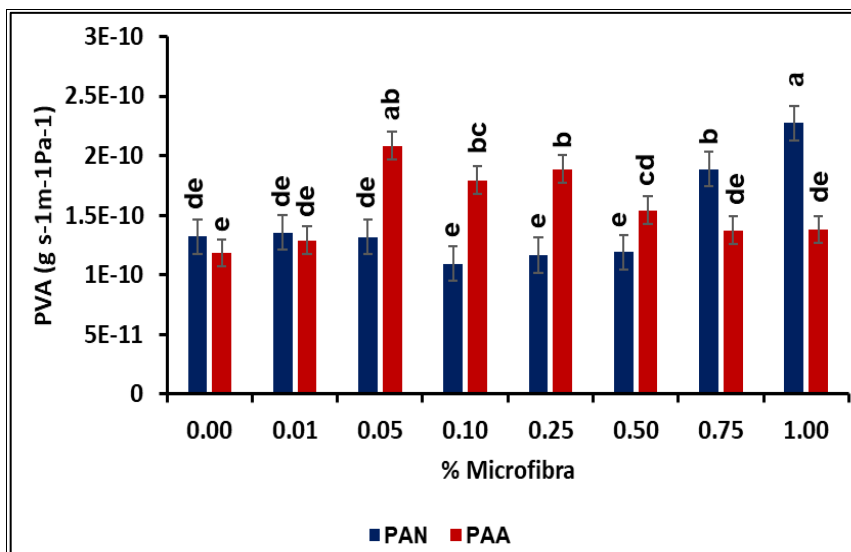


Figura 21. Permeabilidad al vapor del agua (PVA) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ( $P \leq 0.05$ ).

A partir de los valores obtenidos de PVA, se observó una tendencia heterogénea entre las membranas formuladas con almidón nativo y almidón acetilado. Los valores más elevados se registraron en los tratamientos con concentraciones de microfibra de 0.05 a 1.00 %. Este comportamiento podría atribuirse a la higroscopicidad de la microfibra de lechuguilla, así como al acomodo estructural entre el almidón termoplastificado y la microfibra, ya que esta última podría actuar como un “transportador” de moléculas de agua, incrementando el flujo de agua conforme aumenta su presencia en las películas (Che Hamzah et al., 2024). Estos resultados indican que las películas elaboradas a base de almidón nativo mostraron una mejor integración con la microfibra de lechuguilla en comparación con las membranas obtenidas a partir de almidón acetilado.

Se observó que el valor más alto obtenido fue en el tratamiento 1.00 % de microfibras con almidón nativo. Podría inferirse que las películas elaboradas bajo las concentraciones de 0.75 y 1.00 % de microfibras mostraron ser la mejor opción bajo las condiciones del presente estudio, ya que, Si se consideran junto con los resultados de tensión a la fractura y porcentaje de elongación, estos factores dieron lugar a un material más resistente, con mayor elasticidad y menor permeabilidad en comparación con los testigos correspondientes.

El Halal *et al.* (2017) reporta un aumento en la PVA utilizando almidón de papa y celulosa, también utilizaron almidón de yuca, esto podría deberse a la estructura propia de cada tipo de almidón.

Por otro lado, Navarrete-Tumbaco *et al.* (2023), en su estudio evidenciaron menor paso al vapor de agua para las membranas de almidón acetilado de arroz, plastificadas con glicerol. Esto podría indicar que, a más bajo valor para esta variable, mejores serían los resultados al utilizarse como material de recubrimientos de alimentos o de envasado, ya que podría favorecer la conservación de las características originales por más tiempo. La permeabilidad al vapor de agua se incrementó con el grado de acetilación, lo que representa una estrategia potencial para disminuir la higroscopicidad de los almidones y generar materiales con propiedades mejoradas de hidrofobicidad.

#### IV. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demuestran que es factible formular y caracterizar materiales biobasados a partir de polisacáridos provenientes de fuentes vegetales no convencionales del semidesierto mexicano.

El uso de almidón, tanto nativo como modificado por acetilación, en combinación con microfibras de lechuguilla, permitió desarrollar biopelículas con propiedades ajustables para aplicaciones en el envasado y transporte de alimentos.

En cuanto a las propiedades ópticas, se percibió que tanto el tipo de almidón como la concentración de microfibras influyeron de manera significativa en la luminosidad, índice de amarillamiento y opacidad. Las biopelículas con almidón nativo, particularmente a bajas concentraciones de microfibras, presentaron mayor luminosidad, lo que sugiere una mejor integración del refuerzo y una matriz más homogénea. Por el contrario, las membranas formuladas con almidón acetilado mostraron una disminución progresiva en la luminosidad con el aumento de la fibra, lo cual puede deberse a una mayor rugosidad superficial, que dispersa más la luz incidente. Asimismo, el índice de amarillamiento aumentó con la concentración de microfibras, especialmente en formulaciones con almidón nativo, efecto atribuible al color natural del refuerzo y su influencia en la apariencia visual del material.

En términos químico-estructural, el análisis mediante FTIR permitió identificar bandas características del almidón y evidenciar los cambios derivados de la acetilación. Las membranas con almidón nativo mostraron mayor intensidad en las bandas asociadas a grupos hidroxilo (-OH), indicando una capacidad aumentada de interacción molecular mediante enlaces de tipo puente de hidrógeno. En contraste, las películas con almidón acetilado presentaron bandas relacionadas con grupos acetilo, confirmando la modificación química. Además, el índice de cristalinidad aparente fue mayor en las películas con almidón nativo, lo que sugiere una estructura más ordenada, mientras que las formulaciones con almidón acetilado mostraron una matriz más amorfa y menos organizada.

La caracterización conjunta por DRX y FTIR permitió observar cómo los distintos tratamientos con microfibras afectan la estructura de las películas según el tipo de almidón. Indican que la respuesta estructural depende tanto del tipo de almidón como del nivel de microfibras, donde la cristalinidad y la organización molecular no siempre evolucionan de manera paralela: los tratamientos de almidón acetilado favorecen la formación de cristales internos incluso con menor interacción química, mientras que los tratamientos de almidón nativo promueven mayor cohesión fibra–matriz a altas concentraciones, aunque con un incremento más limitado en la cristalinidad aparente. La combinación de DRX y FTIR, por lo tanto, permitió diferenciar entre el orden cristalino y el orden molecular, ofreciendo una comprensión integral del efecto de los tratamientos sobre la estructura de las biopelículas.

En relación con la interacción con el agua, se observó que las membranas formuladas con almidón nativo mostraron una afinidad superior, evidenciada por su mayor capacidad de absorción y elevada permeabilidad al vapor de agua. Esto se relaciona con la naturaleza hidrofílica del almidón nativo y la existencia de grupos funcionales que facilitan la formación de enlaces con moléculas de agua. La acetilación, en cambio, redujo esta afinidad, probablemente debido al reemplazamiento parcial de grupos hidroxilo por grupos acetilo, lo que resultó en una matriz menos polar y más resistente a la humedad. La incorporación de microfibras, por su parte, también contribuyó a modular esta propiedad, actuando como una vía adicional para el transporte de vapor, particularmente en las formulaciones con almidón nativo.

En relación con las características mecánicas, la tensión a la fractura y el porcentaje de deformación se incrementaron en las biopelículas formuladas con almidón acetilado en comparación con las elaboradas a partir de almidón nativo. Estos hallazgos sugieren que la modificación química del almidón no solo potencia la flexibilidad del material, sino que también promueve una distribución más homogénea de los esfuerzos en la matriz polimérica. La microfibras de lechuguilla, en concentraciones moderadas, actuó como refuerzo estructural,

contribuyendo a mejorar la resistencia sin afectar negativamente la flexibilidad del material.

En conjunto, esto confirma que la combinación de almidón acetilado y microfibra permite diseñar películas biobasadas con propiedades ópticas, estructurales, mecánicas y de barrera ajustables según los requerimientos y/o necesidades particulares de cada posible aplicación. Esta estrategia emerge como una opción innovadora y ecológicamente viable para la elaboración de envases biodegradables, con perspectiva de aplicación en la industria alimentaria, alineándose con los esfuerzos internacionales de mitigación del impacto ambiental de los plásticos convencionales.

## REFERENCIAS

- Agudelo-Zamudio, C., López, A. M., Ramírez, J. A., & Gómez, P. R. (2023). Efecto de las modificaciones con ácido acético e hidróxido de calcio sobre las propiedades funcionales y reológicas del almidón de ñame (*Dioscorea esculenta*L.). *TecnoLógicas*, 26(58),e2802. <https://doi.org/10.22430/22565337.2802>
- Aguilar-Palazuelos, E., Pérez Vega, L. F., Calderón Castro, A., & Fitch-Vargas, P. R. (2023). Functional characterization of edible films based on reactive extrusion acetylated corn starch. *Food Hydrocolloids*, 134, 108098. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108098>
- Amaya, P. Andrés, E.,. (2017). *Evaluación de la biodegradabilidad de biopolímeros formulados a partir de ácido poliláctico (PLA) con almidón de achira, banano y oca.*
- Amigó, J. M. (2002). X-ray diffraction of polycrystalline materials from Professor Amorós times to nowadays.
- Anchundia, K., Santacruz, S., & Coloma, J. (2016). Caracterización física de películas comestibles a base de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*). *Revista chilena de nutrición*. 43, 394-399.
- Apriyanto, A., Compart, J., & Fettke, J. (2022). A review of starch, a unique biopolymer – Structure, metabolism and in planta modifications. *Plant Science*, 318, 111223. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111223>
- Azeredo, H. M. C., Santos, J. C., & Lima, A. R. (2009). Nanoreinforced alginate–acerola puree coatings on acerola fruits. *Food Research International*, 42(9), 1243–1247. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.04.009>
- Bertuzzi, M. A., Castro Vidaurre, E. F., Armada, M., & Gottifredi, J. C. (2007). *Water vapor permeability of edible starch-based films.* *Journal of Food Engineering*, 80(3), 972–978. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.07.010>

- Byshkov, A. L., et al. (2020). Changes in the crystallinity degree of starch having different types of crystalline structure under mechanical activation. *Polymers*, 12(7), 1518. <https://doi.org/10.3390/polym12071518>
- Carrero, M. G., & Rodríguez, C. R. (2019). Synthesis and characterization of a novel biomaterial based on chitosan modified with amino acids.
- Carrión-Prieto, P., García, R., & López, A. (2019). Cristalinidad de microfibras de celulosa obtenidas de *Cistus ladanifery Erica arborea*. *Maderas. Ciencia y tecnología, ahead of print*, 0–0. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2019005000402>
- Cavero, A., Arturo, H., & Benites, A. (2016). *Evaluation of chemical and mechanical properties of biopolymers by modified potato starch*.
- Che Hamzah, N. H., Khairuddin, N., & Muhamad, I. I. (2024). Preparation and characterization of starch-based pH indicator films for anthocyanin release. *Food Research*, 8(S3), 110–116. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.8\(S3\).6](https://doi.org/10.26656/fr.2017.8(S3).6)
- De Dios-Ávila, N., Tirado-Gallegos, J. M., Ríos-Velasco, C., Luna-Esquivel, G., Isiordia-Aquino, N., Zamudio-Flores, P. B., Estrada-Virgen, M. O., & Cambero-Campos, O. J. (2022). Physicochemical, structural, thermal and rheological properties of flour and starch isolated from avocado seeds of landrace and Hass cultivars. *Molecules*, 27(3), 910. <https://doi.org/10.3390/molecules27030910>
- Escobar Guadarrama, J. A. (2014). *Elaboración y caracterización de biopelículas elaboradas con quitosano y adicionadas con partículas de almidón* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Espinosa, M., et al. (2009). Investigación en las ciencias y tecnología de los alimentos. *Tesis de licenciatura*, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Espino-Pérez, E., Hernández-Ruiz, J., & Pérez-González, J. (2016). *Efecto del proceso de acetilación sobre almidones nativos de ñame (Dioscorea*

- spp.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69(2), 7997–8006. <https://doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59144>
- Flores, M. J. (2022). *Establecimiento de las condiciones de acetilación de microcelulosa obtenida a partir de fibras de Agave de lechuguilla Torr.*
- Gadhawe, R. , Das, A. , Mahanwar, P. and Gadekar, P. (2018) Starch Based Bio-Plastics: The Future of Sustainable Packaging. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 8, 21-33
- García Acosta, O. R. (2022). *El almidón: alimento ancestral revestido de nanotecnología*. Academia.edu. [https://www.academia.edu/71321502/El\\_Amid%C3%B3n\\_Alimento\\_ancestral\\_revestido\\_de\\_nanotecnolog%C3%ADa](https://www.academia.edu/71321502/El_Amid%C3%B3n_Alimento_ancestral_revestido_de_nanotecnolog%C3%ADa)
- García, Y. G., Ramírez, J. L., & Contreras, D. (2012). *Síntesis y biodegradación de polihidroxialcanoatos: Plásticos de origen microbiano.*
- González López, D. M., Rivera, J., & Martínez, A. (2023). Propiedades físico-mecánicas y funcionales de películas a base de quitosano incorporadas con nanopartículas de plata. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 17(32), 1e–18e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2024.32.69752>
- Guede, D. (2013). Biomechanics and bone: Basic concepts and classical mechanical trials.
- Guerra-DellaValle, D., Bello-Pérez, L. A., González-Soto, R. A., Arámbula-Villa, G., & Solorza-Feria, J. (2008). Efecto del tiempo de reacción en la acetilación del almidón de plátano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 7(3), 283–291. [https://doi.org/10.24275/rmiq/almidon/acetilacion/tiempo\\_reaccion](https://doi.org/10.24275/rmiq/almidon/acetilacion/tiempo_reaccion) [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-27382008000300013&script=sci\\_abstract](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-27382008000300013&script=sci_abstract)
- Halal, S. M. E., Colussi, R., Pinto, V. Z., Bartz, J., Radunz, M., Carreño, N. L. V., & Zavareze, E. D. R. (2015). Structure, morphology and functionality of

- acetylated and oxidised barley starches. *Food Chemistry*, 168, 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.046>
- Hernández Pérez, I. A. (2021). *Obtención y caracterización de nanocelulosa a partir de fibras de lechuguilla como refuerzo de un biocomposito*.
- Hernández-Centeno, F., García-Ríos, D., Sánchez-Hernández, L., & Morales-González, J. A. (2020). Physicochemical, thermal, rheological and morphological characteristics of flour and starch from a non-conventional source: *Cucurbita foetidissima* Kunth roots. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(4), 1976–1985. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00444-x>
- Hernández Silva, M. L., & Guzmán Martínez, B. (2009). Biopolymers used in the manufacture of food packaging. *Publicaciones e Investigación*, 3(1), 12–20.
- Liu, H., Xie, F., Yu, L., Chen, L., & Li, L. (2022). Thermal processing of starch-based polymers. *Progress in Polymer Science*, 37(5), 624–643. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.07.001>
- Luque González, A. (2019). Implicaciones ambientales derivadas del petróleo: Caso del agua embotellada. *CIENCIAMATRIA*, 5(9), 466–487. <https://doi.org/10.35381/cm.v5i9.144>
- Halal, S. M. E., Colussi, R., Pinto, V. Z., Bartz, J., Radunz, M., Carreño, N. L. V., & Zavareze, E. D. R. (2015). Structure, morphology and functionality of acetylated and oxidised barley starches. *Food Chemistry*, 168, 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.046>
- Hirai, H., & Takada, H. (2011). Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1683–1692. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.06.004>
- Mayhuire, E. A., Cuadros Huamaní, Y., Miranda Zanardi, L., & Medina de Miranda, E. (2019). Biopelículas producidas con cáscara de naranja y

reforzadas con celulosa bacteriana. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(2), 231–241.

- Mbougueng, P., Tenin, D., Scher, J., & Nzikou, J.M. (2012). Influence of acetylation on physicochemical, functional and thermal properties of potato and cassava starches. *Journal of Food Engineering*, 108(2), 320–326. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.08.006>
- Muñoz, J. M., Rodríguez, A., & Pérez, L. (2014). *Evaluación, caracterización y optimización de un bioplástico a partir de la combinación de almidón de maíz, yuca y glicerol en sus propiedades físicas y de barrera*.
- Jaramillo, H. E., & Andrade, N. C. Á. J. (2011). *Fundamentos y aspectos generales del aleamiento mecánico*.
- Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. (2012). *Edible and biodegradable starch films: A review. Food and Bioprocess Technology*, 5(4), 1365–1382. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0835-4>
- Jirón-García, E. G., Rodríguez-Mora, K., & Bernal-Samaniego, C. (2022). Obtención de nanocelulosa a partir de raquis de palma africana y bagazo de caña. *Tecnología en Marcha*, 35(2), 167–181. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5609>
- Kadam, S., Reddy, N., & Raorane, C. (2019). Enhancing barrier and antimicrobial properties of biodegradable films using nanoparticle incorporation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130, 1213-1224. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.178>
- Kaushik, R., Balasubramanian, R., & Dunstan, H. (2014). Microbial quality and phylogenetic diversity of fresh rainwater and tropical freshwater reservoir. *PLOS ONE*, 9(6), e100737. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100737>
- Kwon, S.-J., Chang, Y., & Han, J. (2017). Oregano essential oil-based natural antimicrobial packaging film to inactivate *Salmonella enterica* and yeasts/molds in the atmosphere surrounding cherry tomatoes. *Food Microbiology*, 65, 114-121.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.02.004>

- Kowalczyk, D., Kwiatkowski, J., & Kwiatkowski, W. (2011). *Modification of starches and flours by acetylation and its dual modifications. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 61(3), 163–171. <https://doi.org/10.2478/v10222-011-0030-6>
- Liu, S., Lu, H., Zhang, S., Shi, Y., & Chen, Q. (2022). Phages against pathogenic bacterial biofilms and biofilm-based infections: A review. *Pharmaceutics*, 14(2), 427. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14020427>
- Luque González, A. (2019). Implicaciones ambientales derivadas del petróleo: Caso del agua embotellada. *CIENCIAMATRIA*, 5(9), 466–487. <https://doi.org/10.35381/cm.v5i9.144>
- Mali, S., Sakanaka, L. S., Yamashita, F., & Grossmann, M. V. E. (2005). Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect. *Carbohydrate Polymers*, 60(3), 283–289.
- Mano, J., Sato, K., & Watanabe, K. (2003). *Structure, morphology and functionality of acetylated and oxidised barley starches*. *Journal of Cereal Science*, 38(3), 281-288. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00039-9)
- Mayhure, E. A., Ortiz, R., López, J., & Vilchez, M. (2019). Biopelículas producidas con cáscara de naranja y reforzadas con celulosa bacteriana. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(2), 189–199.
- Molina, L., Chávez, M., & Guzmán, P. (2019). Propiedades fisicoquímicas, funcionales y estructurales de almidones nativos y acetilados obtenidos a partir de la papa (*Solanum tuberosum* var. 'única'). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(1), 88–102.
- Müller, C. M. O., Laurindo, J. B., & Yamashita, F. (2009). *Composites of thermoplastic starch and microcrystalline cellulose: Effect of the cellulose content on the structure, thermal and physical properties*. *Carbohydrate Polymers*, 77(3), 293–299. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.12.033>
- Muñoz, J. M., Osorio, L. F., & Ruano, J. (2014). *Evaluación, caracterización y optimización de un bioplástico a partir de la combinación de almidón de maíz, yuca y glicerol en sus propiedades físicas y de barrera*. Zamorano.

- Nair, S. S., Trafialek, J., & Kolanowski, W. (2023). Edible packaging: A technological update for the sustainable future of the food industry. *Applied Sciences*, 13(14), 8234. <https://doi.org/10.3390/app13148234>
- Navarrete-Tumbaco, C. J., Sánchez, M., & Ortega, D. (2023). *Obtención y caracterización de bioplásticos a partir de almidón acetilado de semillas de aguacate*. <http://www.saber.ula.ve/avancesenquimica>
- Navia, D. P., Ayala, A. A., & Villada, H. S. (2012). *Modelación matemática de las isotermas de adsorción en materiales bioplásticos de harina de yuca*.
- Parra, J. (2019). *Obtención de biofilm a partir del almidón de zanahoria blanca (Arracacia xanthorrhiza) y de camote (Ipomoea batatas) como alternativa al uso de material plástico derivado de petróleo*.
- Prieto-Méndez, J., Rodríguez, A., & Morales, H. (2010). Acetilación y caracterización del almidón de cebada. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 6(2), 55–62.
- Ratner, B. D., & Bryant, S. J. (2004). Biomaterials: Where we have been and where we are going. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 6, 41–75. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.6.040803.140027>
- Salazar Palma, A. M. (2020). *Caracterización fisicoquímica y microbiológica de films basados en almidón de camote (Ipomoea batatas) y aceite esencial de orégano (Origanum vulgare) y tomillo (Thymus vulgaris)*.
- Santana, M. S. N., Souza, A. L. S., & Andrade, E. H. A. (2018). *Essential oils: Source of antioxidants and role in food preservation*. En M. S. N. dos Santos, C. E. D. Oro, B. M. Dolianitis, J. H. C. Wancura, M. V. Tres, & G. L. Zabot (Eds.), *Essential Oils – Applications and Trends in Food Science and Technology* (pp. 173–189). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-99476-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-99476-1_10)
- Santos de Cunha Pereira, J., Fuentes Fuentes, M. V., & Teiga de Durão Mauricio, P. J. B. (2023). Influencia del color del material de cementación y espesor de la cerámica en las propiedades ópticas de carillas de cerámica feldespática y de disilicato de litio.

- Sarango, L. de J. (2022). *Predicción de propiedades ópticas en biopolímeros con base a residuos del café (Coffea) mediante espectroscopia THz, acoplado a herramientas quimiométricas.*
- Serrano Riaño, J. Y. (2010). Polihidroxicanoatos (PHAs): Biopolímeros producidos por microorganismos. Una solución frente a la contaminación del medio ambiente. *Teoría y Praxis Investigativa*, 5(2), 35-44.
- Shankar, S., Rhim, J. W., & Anand, S. (2016). Physicochemical and functional properties of chitosan films incorporated with silver nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 61, 326-334. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.05.023>
- Shareyko, I. (2011). *La experiencia latinoamericana en la solución del problema del plástico en el medio ambiente.* Recuperado de <http://edoc.bseu.by/>
- Sharma, S., Barkauskaite, S., Duffy, B., & Jaiswal, A. K. (2021). Characterization of starch based composite films reinforced with plant fibres for food packaging applications. *Carbohydrate Polymers*, 254, 117314. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117314>
- Sodhi, N. S., & Singh, N. (2005). Characteristics of acetylated starches prepared using starches separated from different rice cultivars. *Journal of Food Engineering*, 70(1), 117–127.
- Soto Velásquez, M. A., Hernández, D., Martínez, J. L., & Rojas, C. (2023). Aprovechamiento del raquis del maíz (*Zea mays*) para la elaboración de un biopolímero. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), 11575–11595. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i2.6406](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.6406)
- Souza, D. G., Resende, O., Pilon, L., & Leite Resende, L. F. (2020). Caracterização físico-química e tecnológica de farinha de batata-doce biofortificada seca em diferentes temperaturas. *Research, Society and Development*, 9(11), e339112039. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.2039>
- Sulbarán, A., Matiz, G. E., & Baena, Y. (2018). Acetilación del almidón de millo (*Pennisetum glaucum*) y evaluación de su aplicación como posible excipiente. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-*

- Farmacéuticas*, 47(2), 255–276. <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v47n2.73969>
- Tang, M. C., & Copeland, L. (2006). Characterization of differently sized granule fractions of yellow pea starch. *Carbohydrate Polymers*, 64(1), 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.11.001>
- Tirado-Gallegos, J. M., Espinoza-Sandoval, E. A., & Gómez-Torres, R. A. (2024). Estudio preliminar de las propiedades físicas y antibacteriales de películas de almidones modificados de avena mezclados con quitosano. *Biotecnia*, 26, 197–210. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v26.2072>
- Tongdeesoontorn, W., Mauer, L.J., Wongruong, S. *et al.* Effect of carboxymethyl cellulose concentration on physical properties of biodegradable cassava starch-based films. *Chemistry Central Journal* 5, 6 (2011). <https://doi.org/10.1186/1752-153X-5-6>
- Torres Becerril, M., Carmona García, R., & Aguirre Cruz, A. (2015). Obtención y caracterización estructural y funcional de almidón acetilado de malanga (*Colocasia esculenta* Schott). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(4), 801–814.
- Trela, V. D., Peña, A. C., & Núñez, R. L. (2018). *Obtención y caracterización de almidón acetilado de mandioca.*
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2010). *Municipal solid waste generation, recycling, and disposal in the United States: Facts and figures for 2010.* Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- Valle Álvarez, L., & Aldás Sandoval, M. B. (2017). *Obtención, caracterización y evaluación de la biodegradabilidad de biopolímeros formulados a partir de poliácido láctico y almidón termoplástico.*
- Villada, H. S., Acosta, H. A., & Velasco, R. J. (2007). Biopolymers naturals used in biodegradable packaging.

- Wang, J., & Advani, S. G. (1993). A numerical simulation of short fiber orientation in injection molding. *Polymer Composites*, 14(4), 292–304. <https://doi.org/10.1002/pc.750140405>
- Warren, F. J., Gidley, M. J., & Flanagan, B. M. (2016). Infrared spectroscopy as a tool to characterise starch ordered structure—a joint FTIR–ATR, NMR, XRD and DSC study. *Carbohydrate Polymers*, 139, 35–42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.11.066>
- Xu, Y., Miladinov, V., & Hanna, M. A. (2004). Synthesis and characterization of starch acetates with high substitution. *Cereal Chemistry*, 81(6), 735–740. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.6.735>
- Yao, X., Qin, Y., Zhang, M., Zhang, J., Qian, C., & Liu, J. (2021). Development of active and smart packaging films based on starch, polyvinyl alcohol and betacyanins from different plant sources. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 358–368. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.04.152>
- Yoplac, I. J., Goñas, K., Bernal, W., Vásquez, H. V., & Maicelo, J. L. (2021). Caracterización química y digestibilidad *in vitro* de semillas y subproductos agroindustriales amazónicos con potencial para alimentación animal. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(3), e18765. <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i3.18765>
- Zamudio-Castellanos, G. A. (2014). Aplicaciones de las biopelículas comestibles en la industria alimenticia.
- Zamudio Flores, P., Bello Pérez, L. A., Vargas Torres, A., Hernández Uribe, J. P., & Romero Bastida, C. A. (2006). Caracterización parcial de películas preparadas con almidón oxidado de plátano. *Agrociencia*, 40(5), 617–626.
- Zavareze, E. R., & Dias, A. R. G. (2011). Films made from plasma-modified corn starch. *Starch – Stärke*, 63(5), 335–340. <https://doi.org/10.1002/star.201000277>
- Zhang, Y., & Jiang, H. (2020). Molecular interactions and barrier properties of polymer films reinforced with nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 246, 116582. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116582>