**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA**

# “OBTENCIÓN DE UN BIOPLÁSTICO A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA USO COMO ENVOLTURA DE ALIMENTOS”

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**


**PRESENTA:**
**MARICELA VILLAFAÑA JARAMILLO**

**No. CONTROL:**
**M23280231**

**DIRECTORA DE TESIS:**
**DRA. CLAUDIA ROSARIO MURO URISTA**

**CODIRECTOR:**
**DR. RENÉ SALGADO DELGADO**



**METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, JUNIO DE 2024**

Educación
Secretaría de Educación Pública

Tecnológico Nacional de México

**Instituto Tecnológico de Toluca**
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Metepec, Edo. de México, 11/Junio/2025

**MARICELA VILLAFAÑA JARAMILLO**
**CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA**
**EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTE**

De acuerdo con los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México y las disposiciones en este Instituto, habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado **"OBTENCIÓN DE UN BIOPLÁSTICO A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA USO COMO ENVOLTURA DE ALIMENTOS"**, la División de Estudios de Posgrado e Investigación de este Instituto, concede la Autorización para que proceda al envío del trabajo final vía correo Institucional.

Sin más por el momento, quedo de usted.

**A T E N T A M E N T E**
***Excelencia en Educación Tecnológica®***
"Educación, integridad y ciencia"

Educación

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**FRANCISCO JAVIER ILLESCAS MARTÍNEZ**
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**
**E INVESTIGACIÓN**

ccp. Archivo
FJIM/MCCL

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

**Instituto Tecnológico de Toluca**
Comunicación y Difusión

Metepec, Edo. de México, 06/junio/2025

**DR. FRANCISCO JAVIER ILLESCAS MARTINEZ**
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**
**E INVESTIGACIÓN**

**P R E S E N T E**

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada **"OBTENCIÓN DE UN BIOPLÁSTICO A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA USO COMO ENVOLTURA DE ALIMENTOS"**, que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de **MAESTRA en Ciencias en Ingeniería Ambiental** presenta el **C. MARICELA VILLAFAÑA JARAMILLO** con número de control **M23280231** para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la impresión del mismo.

**A T E N T A M E N T E**

**DRA. CLAUDIA ROSARIO MURO URISTA**
**DIRECTORA DE TESIS**

**DR. RENÉ SALGADO DELGADO**
**CODIRECTOR DE TESIS**

**DRA. YOLANDA ALVARADO PÉREZ**
**REVISORA DE TESIS**

**M.C. CLAUDIA DELGADO HERNÁNDEZ**
**REVISORA DE TESIS**

ccp. Archivo
FJI/mccl

2025 Año de La Mujer Indígena

Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México,
C.P. 52149, Tels. Dirección: 7222087205, Conmut.: 7222087200
e-mail: info@toluca.tecnm.mx tecnm.mx | toluca.tecnm.mx

# AGRADECIMIENTOS

A lo largo de este camino académico, he contado con el apoyo, la guía y el cariño de muchas personas a quienes deseo expresar mi más sincero agradecimiento.

A Dios, por brindarme la fuerza, la salud y la sabiduría necesarias para superar los desafíos y alcanzar esta meta.

A mis profesores del posgrado, por su dedicación, compromiso y por compartir su conocimiento con pasión. Gracias por motivarme a pensar críticamente y por enseñarme a ver la ciencia como una herramienta para transformar nuestro entorno.

A mi asesora, Dra. Claudia Muro Urista por su acompañamiento cercano, su paciencia y su orientación constante. Su apoyo fue fundamental para el desarrollo y culminación de este trabajo.

A mis compañeros, por los momentos compartidos, el compañerismo y el aprendizaje mutuo. Gracias por estar presentes en cada etapa del camino.

A mi familia, por ser mi refugio y mi impulso en todo momento.

A mi amado esposo, por su amor incondicional, su comprensión y por asumir con generosidad cada sacrificio que este proceso implicó.

A mis adoradas hijas, porque su sola existencia le da sentido a todo. Su sonrisa fue mi mayor motivación.

A mi mama y hermanos, por inculcarme desde niña el valor del esfuerzo, la perseverancia y la educación como medio para crecer.

A todas las personas que, de una u otra forma, me acompañaron en este proceso, gracias por formar parte de este logro.

Con profunda gratitud

Maricela Villafaña Jaramillo

# DEDICATORIAS

A Dios, por darme la fortaleza, la salud y la sabiduría para alcanzar esta meta.

A mis profesores, por compartir con generosidad su conocimiento, por sus enseñanzas y exigencia académica, que me motivaron a ser mejor cada día. Gracias por sembrar la pasión por la ciencia, la investigación y la responsabilidad ambiental.

A mi asesora, y directora de tesis Dra. Claudia Muro Urista por su paciencia, guía constante y compromiso en cada etapa de este proyecto. Su dedicación fue fundamental para culminar con éxito este trabajo.

A mis compañeros, con quienes compartí desvelos, dudas, aprendizajes y muchas risas. Gracias por caminar a mi lado en este recorrido y convertirlo en una experiencia inolvidable.

A mi amado esposo, por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional, incluso en los momentos más difíciles.

A mis queridas hijas, por ser mi motor, mi alegría y mi inspiración constante. Esta meta también es de ustedes.

A mi mama y hermanos, por su amor, confianza y ejemplo de perseverancia.

Con gratitud infinita Maricela Villafaña Jaramillo

# RESUMEN

Una alternativa para disminuir el problema de residuos plásticos consiste en la fabricación de materiales biodegradables que sean menos agresivos al planeta y capaces de sustituir a los ya existentes.

Particularmente, los residuos industriales alimentarios constituyen un medio para la obtención de biopolímeros, lo cual, a su vez, también reduce el problema ambiental por residuos orgánicos, ya que éstos son dispuestos en rellenos sanitarios, generando un costo por su retiro y disposición, mientras que su almacenamiento en las plantas también crea problemas de contaminación. Por tanto, su aprovechamiento es una vía para reducir la contaminación y disminuir los gastos por disposición de residuos en las empresas.

Por otro lado, la utilización de residuos alimentarios para la producción de bioplásticos contribuye a la consolidación de un modelo de economía circular y evita riesgos asociados a la seguridad alimentaria, a diferencia de aquellos bioplásticos derivados directamente de cultivos agroalimentarios

En este trabajo se utilizaron residuos alimentarios industriales provenientes de una empresa de aditivos del Estado de México, que incluyen semilla de aguacate, bagazo de betabel y zanahoria, y tallo de maíz.

Como primera etapa de la investigación se llevó a cabo la extracción de celulosa de residuos de zanahoria, betabel y tallo de maíz (piel, bagazo, tallos y trozos no seleccionados del producto) así como la extracción de almidón de la semilla de aguacate y se realizó la determinación de grupos funcionales mediante la técnica de FTIR para determinar su efectiva extracción mediante la determinación de los grupos funcionales de celulosa y almidón, lo cual fue confirmado por esta técnica y se presenta en los datos obtenidos.

Una segunda etapa fue utilizada para la obtención de películas a base de grenetina y glicerol como matriz base (control) a la que se le incorporaron diferentes concentraciones almidón de semilla de aguacate, otras de celulosa de cada uno de los residuos de tallo de maíz, así como piel y bagazo de betabel y zanahoria, y las combinadas de ambos, celulosa y almidón. A estas películas se le determinaron

propiedades, químicas, morfológicas, mecánicas y de permeabilidad por medio de las técnicas de FTIR y, SEM, del ensayo de la resistencia a la tracción con la maquina universal de ensayos y ángulo de contacto respectivamente.

Dada la diferencia entre películas con celulosa, almidón y combinadas por almidón-celulosa, el resultado de su caracterización mostró diferencias significativas entre ellas y entre la película control.

Las películas de almidón mostraron una superficie transparente y homogénea, mientras que las de celulosa, opaca y rugosa, y en las combinadas, predominó ésta última característica.

En los estudios de ángulo de contacto con agua, todas mostraron valores por encima de 90°, indicando que se trata de películas hidrofóbicas. Sin embargo, las películas con tallo maíz mostraron los ángulos de contacto más altos (123°). La permeabilidad de las películas también confirmó que las de tallo de maíz presentaron menos permeabilidad al agua.

Por otro lado, en las pruebas mecánicas, se obtuvo que el almidón de semilla de aguacate actuó como agente reforzante, reduciendo la capacidad de elongación o deformación e incrementando el módulo de Young en relación con la película control, las de celulosa y las combinadas.

En relación con las propiedades térmicas, las películas combinadas presentaron mayor resistencia, principalmente las que contienen tallo de maíz.

En la tercera etapa de la investigación se llevó a cabo la aplicación de las películas en envoltura de queso Manchego para determinar su cinética de pérdida de peso durante su almacenamiento en refrigeración y utilizando como testigo una película de polietileno. Las películas combinadas con almidón y tallo de maíz dieron los mejores resultados de conservación del queso, indicando pérdidas de peso de 8-15%, mientras que la de polietileno mostro 3-5% durante 21 días. Además, se analizó la degradabilidad de las películas por factores fisicoquímicos como luz agua y aire y el biológico en composta. En esta última, todas las películas fueron degradadas en 20 días y la mayoría también fue degradada en 40 días por factores fisicoquímicos. Después de 40 días se degradaron las películas con celulosa de maíz.

# ABSTRACT

This research explores a sustainable alternative to mitigate the environmental impact of plastic waste through the production of biodegradable films derived from agro-industrial residues. Materials such as avocado seed, beetroot and carrot pulp, and corn stalks, sourced from a company in the State of Mexico, were used. In the first stage, cellulose and starch were extracted from these residues, and their presence was confirmed by FTIR spectroscopy. In the second stage, films were formulated using a gelatin and glycerol-based matrix, incorporating various concentrations of starch and cellulose, both individually and in combination. The films were characterized morphologically, chemically, mechanically, and thermally, and their permeability and contact angle were evaluated. The results revealed significant differences among film types: starch-based films were more homogeneous and translucid, while cellulose-based films were opaquer and less homogenous, and the combined films shared characteristics of these last. Corn stalk-based films exhibited the highest hydrophobicity (contact angle up to 123°) and lowest permeability. Mechanically, starch acted as a reinforcing agent, increasing rigidity and Young´s module. When applied to Manchego cheese packaging, films containing both starch and corn stalks provided better preservation, with weight loss ranging from 8–15%, compared to 3–5% for polyethylene. All films fully degraded in compost within 20 days and showed degradation due to physicochemical factors after 40 days. These findings support the use of food waste as a viable raw material for the development of functional and sustainable bioplastics.

# CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS ..... 11
INTRODUCCION ..... 15
1. FUNDAMENTOS ..... 17
1.1 Polímeros sintéticos y naturales ..... 20
1.1.1 Polímeros sintéticos derivados del petróleo ..... 21
1.1.2 Polímeros sintéticos de origen natural. ..... 22
1.2 Características de los biopolímeros ..... 26
1.3 Aprovechamiento de residuos agroindustriales para la obtención de bioplásticos ..... 27
1.4 Aplicaciones de los bioplásticos ..... 31
2. MÉTODO ..... 33
2.1 Recolección de residuos industriales alimentarios ..... 34
2.2 Acondicionamiento y obtención de polvos de residuos agroalimentarios ..... 34
2.3 Obtención de celulosa y almidón de residuos agroindustriales ..... 36
2.4 Obtención de películas compuestas con semilla de aguacate y residuos de zanahoria, betabel y tallo de maíz ..... 41
2.6 Caracterización de las películas compuestas. ..... 43
2.6.1 Identificación de grupos funcionales ..... 43
2.6.2 Análisis morfológico ..... 44
2.6.3 Propiedades mecánicas ..... 45
2.6.4 Análisis de propiedades térmicas ..... 46
2.6.5 Ángulo de contacto ..... 48
2.6.6 Permeabilidad ..... 49
2.6.7 Pruebas de degradabilidad de las películas ..... 50
2.7 Pruebas de aplicación de las películas en forma de bolsa ..... 51
3 RESULTADOS ..... 52

3.1 Obtención de celulosa y almidón de residuos industriales ..... 52
3.2 Caracterización de residuos industriales (celulosa y almidón) ..... 53
3.2.1 Identificación de grupos funcional de la celulosa ..... 53
3.2.2 Identificación de grupos funcionales del almidón ..... 55
3.2.3 Análisis termogravimétrico de las celulosas ..... 56
3.2.4 Análisis termogravimétrico del almidón ..... 57
3.2.5 Calorimetría diferencial de barrido de las celulosas ..... 58
3.2.6 Calorimetría diferencial de barrido del almidón de semilla de aguacate ... 59
3.2.7 Morfología de celulosa de residuos de betabel, zanahoria y tallo de maíz y almidón de semilla de aguacate ..... 60
3.3 Obtención y caracterización de películas compuestas de almidón de semilla de aguacate y celulosa de residuos de zanahoria, betabel y tallo de maíz ..... 61
3.3.1 Identificación de grupos funcionales de las películas compuestas. ..... 62
3.3.2 Análisis termogravimétrico de las películas ..... 64
3.3.3 Calorimetría diferencial de barrido de las películas ..... 67
3.3.4 Morfología de las películas ..... 68
3.3.5 Ángulo de contacto. ..... 70
3.3.6 Pruebas mecánicas ..... 72
3.3.7 Permeabilidad ..... 78
3.3.8 Pruebas de degradabilidad de las películas ..... 79
3.4 Pruebas de aplicación de las películas en forma de bolsa ..... 81
CONCLUSIONES ..... 83
FUENTES CONSULTADAS ..... 84

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Condiciones de operación utilizadas para la obtención de celulosa..... 41
Tabla 2.2 Composición de las películas obtenidas a base de almidón de semilla de aguacate y celulosa de zanahoria, betabel y tallo de maíz. ..... 42
Tabla 3.1 Eficiencia de la extracción de celulosa y almidón..... 52
Tabla 3.2 Grupos funcionales de la celulosa de betabel, zanahoria y tallo de maíz. ..... 54
Tabla 3.3 Grupos funcionales del almidón de semilla de aguacate..... 55
Tabla 3.4 Pérdida de masa observada a diferente temperatura de las celulosas. 56
Tabla 3.5 Pérdida de masa a diferente temperatura de almidón de semilla de aguacate..... 58
Tabla 3.6 Termogramas DSC de celulosas..... 59
Tabla 3.7 Termogramas DSC de almidón de semilla de aguacate ..... 60
Tabla 3.8 Grupos funcionales del almidón y la celulosa y su presencia en películas ..... 63
Tabla 3.9 Fases de temperatura de las películas desarrolladas de celulosas y almidón de semilla de aguacate. ..... 66
Tabla 3.10 Faces de las temperaturas ..... 67
Tabla 3.11 Análisis de propiedades mecánicas de bioplásticos ..... 72
Tabla 3.12 Resultados del análisis ANOVA y pruebas de comparación de los datos de elongación de las películas A-T mediante la prueba Tukey. ..... 76
Tabla 3.13 Porcentajes de solubilidad e hinchamiento. ..... 78
Tabla 3.14 Degradación fisicoquímicas y bilógica de las películas. ..... 80

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 a) Estructura química del poliestireno, b) polipropileno y c) polimetacrilato de metilo (Seymour y Carraher,1995). ..... 21
Figura 1.2 a) Ácido polilactico (Abdelwahab et al.,2022), b) C6-fluorinada de esteres de celulosa (Guzmán-Puyol et al., 2022). ..... 23

Figura 2.1 Diagrama de flujo del método de investigación ..... 33
Figura 2.2 Residuo de betabel y zanahoria, lavado y en solución de meta- bisulfito, residuo de betabel enjuagado y escurrido. ..... 34
Figura 2.3 Residuo de tallo de maíz cortado, lavado y en solución de meta- bisulfito. ..... 35
Figura 2.4 Semillas de aguacate peladas, cortadas y en solución de meta- bisulfito. ..... 35
Figura 2.5 Muestra el residuo de betabel y zanahoria, secado y residuo de betabel y zanahoria molido y tamizado ..... 35
Figura 2.6 Residuo de tallo de maíz secado, molido y tamizado. ..... 36
Figura 2.7 Semilla de aguacate enjuago, molido, tamizo y sedimento. ..... 37
Figura 2.8 Semilla de aguacate sedimentada, sifonada y almidón húmedo. ..... 37
Figura 2.9 Almidón de semilla de aguacate secado, triturado, tamizado y pesado 37
Figura 2.10 Tallo de maíz pesado, residuo de betabel, zanahoria colocada en solución de hidróxido de sodio ..... 39
Figura 2.11 Residuo de betabel, zanahoria y tallo de maíz enjuagado después de hidrólisis básica ..... 39
Figura 2.12 Residuo de betabel, zanahoria y tallo de maíz en hidrolisis acida. .... 39
Figura 2.13 Residuo de betabel, zanahoria y tallo de maíz enjuagado después de hidrólisis acida. ..... 40
Figura 2.14 Residuo de betabel, zanahoria y tallo de maíz en blanqueamiento ... 40
Figura 2.15 Residuo de betabel, zanahoria y tallo de maíz enjuagado después del blanqueamiento. ..... 40
Figura 2.16 Celulosa de betabel, zanahoria y tallo de maíz escurrido y puesto a secar ..... 40
Figura 2.17 Celulosa de betabel, zanahoria y tallo de maíz secado ..... 41
Figura 2.18 Preparación y obtención de la película compuesta ..... 43
Figura 2.19 Material cortado, analizado, obtención del espectro. ..... 44
Figura 2.20 Porta muestras, baño de oro, análisis morfológico. ..... 44
Figura 2.21 Corte de los bioplásticos, bioplásticos guardados, bioplásticos colocando la cinta y sacando el espesor. ..... 45

Figura 2.22 Colocando biomaterial en máquina universal de pruebas mecánicas, tarando el equipo, iniciando prueba, ruptura de bioplástico. ..... 46
Figura 2.23 Equipo TGA, limpieza de charola y colocada muestra, charola con muestra a analizar, grafico obtenido. ..... 47
Figura 2.24 Equipo DSC, pesando muestra, sellando cápsula, clocando capsula en equipo DSC. ..... 48
Figura 2.25 Equipo para prueba, gota formada en biomaterial, fotografía, con ángulos calculados. ..... 48
Figura 3.1 Polvos de residuos industriales de betabel, zanahoria, tallo de maíz y almidón de semilla de aguacate. ..... 52
Figura 3.2 Espectros IR de celulosas de tallo de maíz (CTM), betabel (CB), zanahoria (CZ) ..... 54
Figura 3.3 Espectro IR de almidón de semilla de aguacate ..... 55
Figura 3.4 Termograma de celulosas de tallo de maíz, betabel y zanahoria que va de los 20°C a los 400°C ..... 56
Figura 3.5 Termograma de almidón de semilla de aguacate que va de los 20°C a los 400°C. ..... 57
Figura 3.6 Termogramas de celulosas que va de los 0 °C a los 400°C. ..... 58
Figura 3.7 Termograma de almidón de semilla de aguate que va de los 0 °C a los 400°. ..... 59
Figura 3.8 Imágenes de los bioplásticos obtenidos, a diferentes cargas. ..... 62
Figura 3.9 Espectro IR de las películas a diferentes cargas de almidón de semilla de aguacate y celulosas. ..... 64
Figura 3.10 TGA del desarrollo de películas de almidón de semilla de aguacate y celulosas. ..... 65
Figura 3.11 Termograma de las películas A, E, I, M, P y T. ..... 67
Figura 3.12 a) Micrografía de películas de diferentes muestras a x250 aumentos. película C, G, K y Ñ. ..... 69
Figura 3.13 a) Micrografía de películas de diferentes muestras a x500 aumentos. película A y I, frontal y transversal. ..... 69
Figura 3.14 Grafica de ángulo de contacto de los bioplástico. ..... 71

Figura 3.15 Gráfica del esfuerzo de tracción máximo de películas. ..... 73
Figura 3.16 Gráfica de la deformación por tracción a la ruptura de películas. ..... 74
Figura 3.17 Gráfica del esfuerzo de tracción máximo de las películas A, B-E. ..... 74
Figura 3.18 Gráfica de deformación por tracción a la ruptura de películas A, A-E.74
Figura 3.19 Porcentaje de pérdida de peso del queso después de 7, 14 y 21 días cuando se envasa con películas bioplásticas hechas de almidón y celulosa. ..... 82
Figura 3.20 Bolsas de películas termosellables de quesos a los 0, 7, 14 y 21 días. ..... 82

# INTRODUCCION

Debido a la alta demanda del plástico, cada año se producen en todo el mundo más de 330 millones de toneladas. Los principales consumidores de plásticos son la industria del embalaje con 40%, seguido por la construcción, con un 20% y la automotriz con un 8%. Esto, genera grandes cantidades de residuos, de los cuales menos del 10% pueden reciclarse, mientras que la mayoría se vierten de manera directa al ambiente, causando impactos incalculables en los ecosistemas.

Los plásticos provienen de materiales fósiles; por tanto, debido a la huella de carbono, la fabricación y el uso de los plásticos provocan un daño ecológico irreversible. El tiempo de degradación es de aproximadamente 400 años, lo que implica un impacto significativo en el ambiente, con efectos adversos.

Como alternativa al problema ambiental planteado, se han desarrollado los bioplásticos, que ofrecen beneficios tanto económicos como ambientales. Estos materiales provienen de recursos renovables, promoviendo la sostenibilidad y reduciendo la huella de carbono. Su uso se alinea con los principios de la, economía circular y con la iniciativa de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) impulsada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

El creciente reconocimiento sobre los beneficios de los bioplásticos junto con la implementación de nuevas normativas está impulsando el desarrollo de esta industria. Se espera que en los próximos años la producción mundial de bioplásticos aumente significativamente, acercándose al objetivo de reemplazar los plásticos convencionales. Sin embargo, aún es necesario profundizar en la investigación, especialmente en el desarrollo de bioplásticos que posean propiedades similares a las de los plásticos convencionales, con el fin de ampliar su aplicación.

En este trabajo se presenta una investigación sobre el uso de residuos agroindustriales de semilla de aguacate, bagazo y piel de betabel y zanahoria para la obtención de películas plásticas que pueden ser útiles para envoltura de alimentos.

El Objetivo general del proyecto fue obtener películas bioplásticas como embalaje de alimentos a partir de residuos agroindustriales, que incluyen almidón de semilla

de aguacate y/o celulosas de residuos de maíz (tallo), y residuos de betabel y zanahoria (piel, bagazo y productos no seleccionados).

Como hipótesis se planteó que el almidón de semilla de aguacate y la celulosa de residuos de tallo de maíz, betabel y zanahoria son útiles para elaborar películas bioplásticas para conservar los alimentos.

La presentación del documento del trabajo de investigación se distribuye en la sección de fundamentos donde se presentan los conceptos relativos a la investigación y el Estado del arte. En la segunda sección la metodología utilizada para el desarrollo de la investigación, y en la tercera sección se presentan los resultados obtenidos de la investigación, presentando las conclusiones y las referencias que dan soporte a dichos resultados.

# 1. FUNDAMENTOS

El crecimiento de la industria del plástico ha superado a casi todos los demás materiales manufacturados. De; 2 millones de toneladas métricas (TM) producidas por año en 1950, la cantidad se incrementó a 322 millones en 2015, y superó los 1000 millones en 2020 (Geyer et al., 2017), lo cual muestra el enorme crecimiento en la producción de los plásticos.

Entre las industrias con mayor demanda de plástico se encuentran las de embalaje (40%), construcción (20%), automotriz (8%) y fabricación de electrodomésticos (Ibrahim et al., 2021); Además, los plásticos están presentes en numerosas actividades humanas como el empaque y traslado de productos.

En todos los casos, la generación de residuos por fabricación y consumo de plásticos es incalculable y tiene impactos ambientales irreversibles, ya que los plásticos prevalecen por muchos años, debido a su estabilidad degradativa (Barnes et al. 2009). La degradación de estos materiales requiere un largo período, que comienza con la disgregación física seguida de la degradación química. De hecho, la primera pieza de plástico producida aún no se ha degradado (Filiciotto & Rothenberg et al., 2021).

La contaminación por plásticos se debe a su origen sintético, ya que son producidos químicamente a partir de materias primas no renovables (derivados del petróleo) y que no se pueden biodegradar. Sólo, después de muchos años, los rayos ultravioletas fragmentan los plásticos en pequeñas partículas, dando origen a los microplásticos Sun et al., (2022), que amplifican el alcance de la contaminación.

En los océanos del mundo hay 170 billones de partículas de plástico flotando, y se espera un aumento de aproximadamente 2.6 veces entre 2016 y 2040 (Ruijter et al., 2019). Sin embargo, el principal problema no es la apariencia visual, sino que estás partículas penetran en los ambientes acuáticos, y son ingeridos por los animales, y, posteriormente, llegan a los humanos a través de las cadenas alimentarias (Thompson et al., 2004). Un estudio reciente reveló que componentes micro plásticos han sido detectados en sangre humana (Leslie et al., 2022). Por tanto, el problema de contaminación por plásticos ha aumentado considerablemente

en los años, constituyendo un desafío complejo, de abordar. Por tanto, es menester restringir las emisiones de contaminación plástica (Eriksen et al., 2023).

Algunas de las alternativas para reducir el daño ecológico causado por plásticos convencionales es el reciclaje, y la fabricación y uso de plásticos biodegradables, Por ejemplo, el Gobierno de Canadá, (2021) comenzó a eliminar progresivamente los plásticos de un solo uso en 2021, y actualmente, varios países se han enfocado en producir bioplásticos. En su caso, China ha lanzado varias políticas e incentivos para la transición hacia envases de fibra vegetal reutilizables/compartibles o compostables /reciclables (Zhou et al., 2020).

De esta forma, los bioplásticos representan actualmente el 1% de la producción total de plástico en el mundo. Según estimaciones de European Bioplastics (2022), la capacidad de producción global de bioplásticos aumentó de 2.05 millones de toneladas en 2017 a 2.44 millones en 2022 y a la fecha continúa incrementándose. La producción de bioplásticos no solo se ha convertido en una estrategia factible para reducir la generación de residuos plásticos no biodegradables, sino, que también puede disminuir la cantidad de residuos agroalimentarios, los cuales pueden ser aprovechados para la producción de estos materiales.

En general, la biomasa lignocelulósica derivada de residuos agroindustriales constituye una alternativa a las materias primas tradicionales, contribuyendo así a la economía circular. Se estima que la cantidad anual mundial de biomasa lignocelulósica obtenida a partir de desechos como paja y astillas derivado de madera puede alcanzar 150 000 millones de toneladas (Vigneswari et al., 2021). Por tanto, ésta puede ser reducida a partir de su aprovechamiento.

Los residuos agroindustriales están constituidos por pulpa, cáscaras, tallos, semillas de frutas y vegetales que se generan durante la cosecha, postcosecha, procesamiento y transformación (Flórez y Rojas, 2019). Debido a sus, características lignocelulósicas, estos residuos se han estudiado como materia prima para la obtención de plásticos biodegradables (Semple et al., 2022).

Entre los materiales que se pueden obtener de residuos agroalimentarios se encuentra la celulosa, los almidones y polisacáridos provenientes de granos de maíz, papas y remolacha azucarera Madival et al., (2009), mientras que otros utilizan la pulpa moldeada de residuos fibrosos (tallos, hojas y vainas de semillas) de cultivos alimentarios primarios como caña de azúcar, palma de aceite, maíz y trigo, así como las semillas de frutas y vegetales (Zhang et al., 2022).

A la fecha existen numerosos estudios que abordan el uso de residuos agroindustriales para la obtención de bioplásticos. Sin embargo, dada la importancia de fabricación y aplicación de estos materiales, las contribuciones en este campo son de gran interés para la industria y la sociedad en general, abriendo múltiples posibilidades de investigación debido a los diversos retos que aún deben superarse. En estos retos se encuentra la reducción de los costos de producción, que deben ser competitivos frente a los plásticos convencionales; El incremento en la aplicación de bioplásticos, la escalabilidad de los procesos productivos; y la mejora de las propiedades de los materiales y productos manufacturados para garantizar su competitividad en el mercado actual.

Entre los materiales que se pueden obtener de residuos agroalimentarios se encuentra la celulosa, los almidones y polisacáridos provenientes de granos de maíz, papas y remolacha azucarera Madival et al., (2009), mientras que otros utilizan la pulpa moldeada de residuos fibrosos (tallos, hojas y vainas de semillas) de cultivos alimentarios primarios como caña de azúcar, palma de aceite, maíz y trigo, así como las semillas de frutas y vegetales (Zhang et al., 2022).

A la fecha existen numerosos estudios que abordan el uso de residuos agroindustriales para la obtención de bioplásticos. Sin embargo, dada la importancia de fabricación y aplicación de estos materiales, las contribuciones en este campo son de gran interés para la industria y la sociedad en general, abriendo múltiples posibilidades de investigación debido a los diversos retos que aún deben superarse.

En estos retos se encuentra la reducción de los costos de producción, que deben ser competitivos frente a los plásticos convencionales, el incremento en la aplicación de bioplásticos, la escalabilidad de los procesos productivos; y la mejora de las propiedades de los materiales y productos manufacturados para garantizar su competitividad en el mercado actual.

## 1.1 Polímeros sintéticos y naturales

Un polímero se define como una sustancia formada por la unión covalente de un número elevado de moléculas pequeñas llamada monómeros, los cuales se repiten a lo largo de la cadena.

La primera clasificación de los polímeros se basa en su origen, que pueden ser natural, sintético y semisintético. Como su nombre lo indica, los polímeros naturales o biológicos se producen de forma natural, como biomoléculas o compuestos que forman parte de los seres vivos, tales como los polisacáridos (celulosa y almidón), proteínas (colágeno, hemoglobina, hormonas, albúmina, etc.) y ácidos nucleicos (DNA y RNA).

Por su parte, los polímeros sintéticos se crean en el laboratorio; su origen puede ser a partir de monómeros derivados del petróleo, pero también a partir de fuentes renovables; por esta razón, éstos reciben el nombre de biopolímeros.
En ambos casos, los polímeros son sintéticos y se pueden denominar llamar plásticos. Su fabricación varia y se controla mediante la temperatura, el tiempo de reacción y la cantidad de monómeros, lo cual determina el largo de la cadena polimérica resultante.

Los polímeros semisintéticos son aquellos que se obtienen al modificar polímeros naturales mediante procedimientos químicos. Por ejemplo, la nitrocelulosa y el caucho vulcanizado.

### 1.1.1 Polímeros sintéticos derivados del petróleo

Después de un proceso de craqueo y reformado del petróleo se obtienen moléculas simples, como etileno y, benceno, a partir de las que se realiza la síntesis del polímero, lo que conduce a la obtención de materiales sintéticos versátiles, especialmente útiles cuando poseen un peso molecular elevado.

Ejemplos de polímeros sintéticos de este origen son el, poliestireno, polimetacrilato de metilo (acrílico), polipropileno, polietileno y cloruro de polivinilo (PVC) (Nicholson et al., 2006).
En la Figura 1.1 se presentan las estructuras químicas de algunos polímeros sintéticos derivados del petróleo.

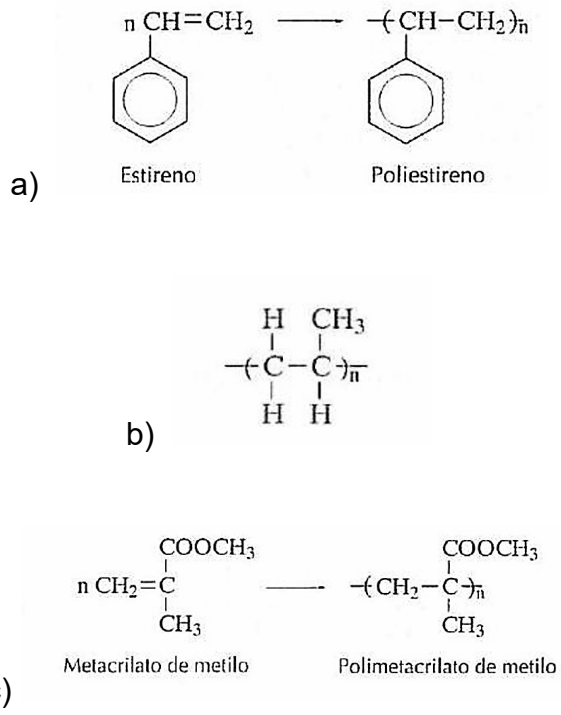



Figura 1.1 a) Estructura química del poliestireno, b) polipropileno y c) polimetacrilato de metilo (Seymour y Carraher,1995).

Actualmente, los polímeros sintéticos derivados del petróleo forman parte integral de la vida humana, ya que están presentes en numerosos artículos de uso cotidiano, como envases de alimentos, piezas de automóviles, prendas de ropa y construcción, entre otras. Por tanto, constituyen la materia prima de muchas industrias que los emplean a gran escala. Sin embargo, el elevado consumo de polímeros sintéticos genera objetos en desuso y residuos que se convierten en contaminantes, cuyas cantidades son enormes y que persisten durante muchos años debido, a que algunos no son biodegradables.

### 1.1.2 Polímeros sintéticos de origen natural.

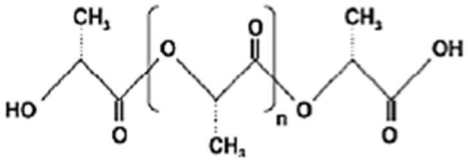
Dentro de los polímeros, además de los sintéticos, existen aquellos obtenidos a partir de productos vegetales y fuentes biológicas renovables, conocidos como biopolímeros, bioplásticos o biobasados (Ibrahim et al., 2021). Este tipo de polímeros también pueden ser biodegradables y compostables, aunque no todos cumplen con estas características.

Según la Asociación Europea de Bioplásticos (European Bioplastics e.V.), un bioplástico es un material biodegradable que incluye los polímeros de origen renovable, es decir de base biológica.
Si un polímero es biodegradable y compostable debe cumplir con la norma UNE-EN 13432 (Thecircularcampus & Thecircularcampus, 2023), que establece los requisitos para la compostabilidad de materiales.

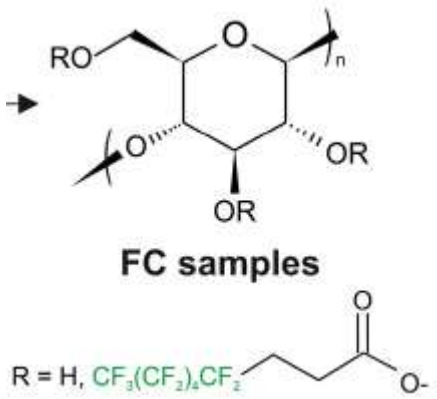
Por tanto, los bioplásticos son una familia de materiales poliméricos que tienen base biológica o son biodegradables, o cumplen ambas características (Pathak et al., 2017).
Las fuentes renovables de los biopolímeros pueden ser de origen vegetal o animal, incluyendo polímeros como la celulosa, el almidón y proteínas como el suero o las

gelatinas. Algunos ejemplos de biopolímeros son el ácido poliláctico (PLA), los derivados de celulosa (CA, CAB) y derivados de almidón (Semple et al., 2022). También existen los biopolímeros obtenidos a partir de microorganismos como algas, bacterias u hongos. Un; ejemplo es el polihidroxibutirato (HPB) y sus copolímeros (Karan et al., 2019).

En la Figura 1.2 Se presentan imágenes de la estructura química de algunos bioplásticos.




a)




b)

Figura 1.2 a) Ácido polilactico (Abdelwahab et al.,2022), b) C6-fluorinada de esteres de celulosa (Guzmán-Puyol et al., 2022).

La principal ventaja de los plásticos biodegradables o compostables es que, tras su uso y al final de su vida útil, se descomponen en un tiempo relativamente corto, lo cual reduce significativamente su impacto ambiental. Además, se fabrican a partir de recursos naturales renovables, como por ejemplo residuos orgánicos, es posible

transformar estos residuos en recursos útiles, evitando su acumulación en vertederos o directamente en la naturaleza (Matsakas et al., 2017).
En las Figura 1.3 y 1.4 se muestran imágenes que contiene la clasificación de los polímeros de acuerdo con su biodegradabilidad y capacidad de compostaje.

En la Agenda 2030 de la Unión Europea, la producción de los polímeros biocomposteables surgen como una opción sostenible para reemplazar a los plásticos no biodegradables y compostables.

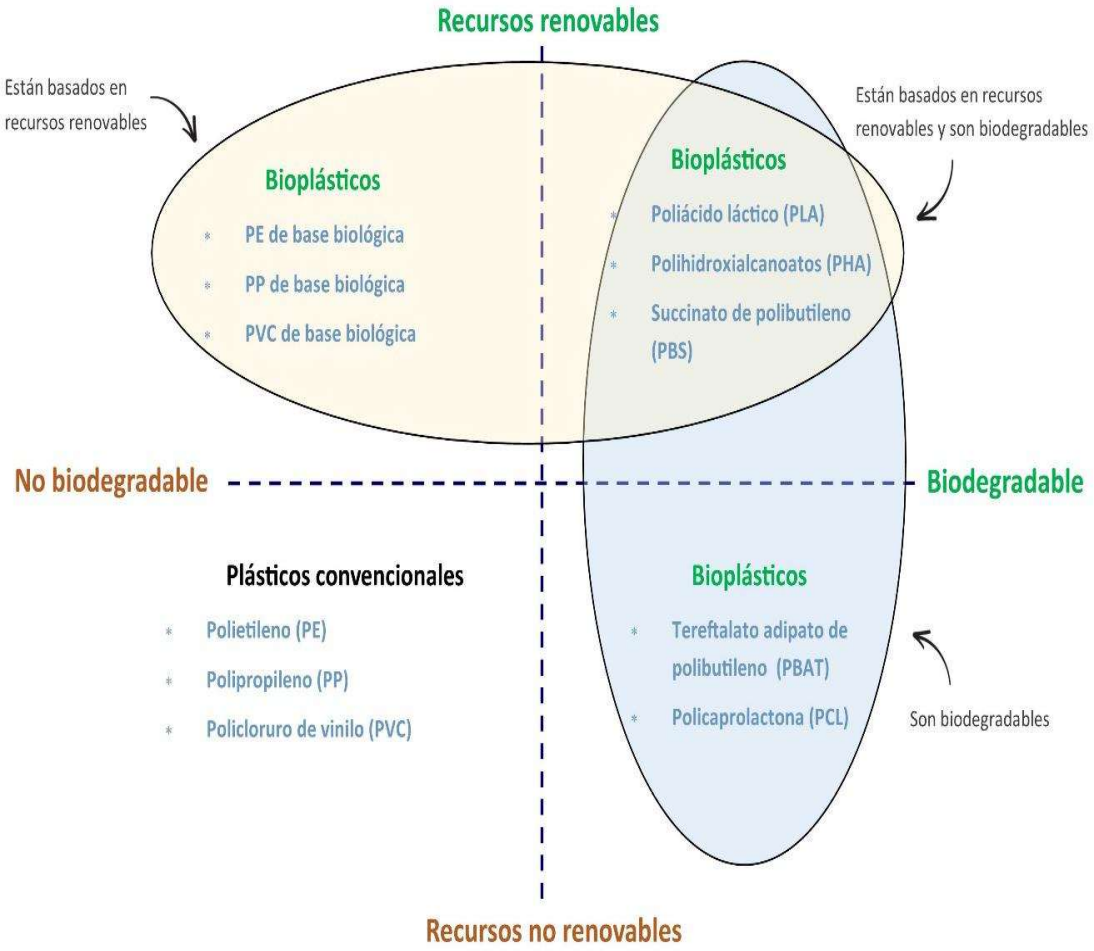



Figura 1.3 Clasificación de los bioplásticos según su origen y biodegradabilidad.
Fuente: European Bioplastics

Figura 1.4 Recolección y disposición de los polímeros terminando su tiempo de vida útil. Fuente: European Bioplastics

Por otra parte, algunos bioplásticos no biodegradables, como el polietileno, el polipropileno y el cloruro de polivinilo, se fabrican a partir de fuentes renovables como el bio-etanol o bio-isobutanol. Estos materiales, aunque son de base biológica, no son biodegradables y son idénticos a los fabricados a partir de fuentes no renovables: por ello, la gestión de sus residuos generados al final de su vida útil es la misma (Sidek et al., 2019). Sin embargo, existen dos diferencias fundamentales entre los bioplásticos no biodegradables y los plásticos convencionales. La primera de ellas es que la fabricación de plásticos convencionales es más económica, debido a que la industria lleva décadas produciéndolos, y cuenta con mercado más amplio y mayor capacidad de producción. La segunda está relacionada con el impacto ambiental, ya que la fabricación de bioplásticos genera un menor impacto debido a que su origen es renovable o porque son biodegradables (Ross et al., 2016).

Es evidente que los bioplásticos aportan beneficios a la economía y al medio ambiente. Su fabricación a partir de recursos renovables promueve la sostenibilidad, reduciendo la acumulación de residuos, limitando la huella de carbono y

disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles (Kaur et al., 2018). Esto se alinea con los fundamentos de la economía circular y con la iniciativa de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) impulsada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (Karan et al., 2019). La conciencia creada con los bioplásticos junto con las nuevas normativas está impulsando el crecimiento de esta industria, y se espera que en los próximos años la producción mundial de estos materiales crezca considerablemente (European Bioplastics, 2022).

## 1.2 Características de los biopolímeros

Entre las principales características de los biopolímeros se encuentran la viscoelasticidad, elasticidad, flujo plástico y fractura. Otras características son relacionadas a su corrosión, conductividad y en algunos casos fosforescencia o fluorescencia (Wic Baena, 2019).

Para conocer las características del bioplástico, se realizan pruebas como el módulo de flexión, que consiste en sacar propiedades de flexión de un material las cuales son propiedades que definen la flexibilidad de un material o la resistencia que opone un material al ser doblado por una fuerza. La resistencia a la flexión se mide como la capacidad de un material para resistir la ruptura bajo un esfuerzo aplicado en el centro de una probeta rectangular apoyada en ambos extremos

Los métodos ASTM D790 y D650 utilizan una probeta moldeada o mecanizada con un espacio (entre los soportes) de al menos 16 veces su espesor.

La resistencia a la tracción, o tenacidad es el máximo esfuerzo que un material puede soportar antes de romperse por estiramiento desde ambos extremos, bajo condiciones controladas de temperatura, humedad y velocidad. El módulo de Young, también llamado módulo de elasticidad longitudinal es un parámetro que consigue revelar el comportamiento de un material elástico en función de la tipología de fuerza que se le aplique y el consiguiente aumento o disminución de la longitud de ese material. Por lo tanto, lo que busca es obtener la relación que se da entre la tensión que se le aplica al objeto en su eje longitudinal y la deformación medida en

ese mismo eje. Así, mide su comportamiento elástico y pronostica también el estiramiento de un material determinado.

La permeabilidad, esta es una característica distintiva de los plásticos, ya que protege o cubre a los alimentos, etc., del agua, vapor y aire principalmente. Es importante controlar la permeabilidad de los bioplásticos, ya que una mayor absorción de agua reduce sus propiedades mecánicas (Bertuzzi et al.,2007).

La viscosidad es otro parámetro relevante, pues determina la capacidad del material para fluir a través de un molde durante el proceso de moldeo al aplicar calor. Las propiedades morfológicas, estas se pueden conocer a través de la Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), y su importancia radica en el efecto que tiene la morfología sobre sus propiedades físicas y mecánicas, también es muy útil para determinar cómo se fusionan las partículas con la matriz, así mismo evaluar la presencia de grietas, burbujas y poros que no sean visibles a simple vista, además nos permite conocer la topografía y las dimensiones especificas del bioplástico y sus componentes (Nigam et al., 2021). La resistencia a la tracción también es de suma importancia en un biopolímero. Se puede obtener con una maquina universal de ensayos y es de las principales características que se buscan en un bioplástico ya que así se puede determinar la potencial aplicación de este.

## 1.3 Aprovechamiento de residuos agroindustriales para la obtención de bioplásticos

Para la moderna industria alimentaria sostenible, los residuos generados representan una de las principales preocupaciones ambientales. Sin embargo, la valorización de residuos de frutas y verduras ofrece la posibilidad de reciclarlos y reutilizarlos. Solo el sector agrícola produce una gran cantidad de residuos de biomasa, como trigo, maíz y soja (Kluts et al., 2019), que son ricos en celulosa, lignina y hemicelulosa (Teo y Wahab et al., 2020; Sadh et al., 2018; Elegbede et al.,

2021). No obstante, aún falta una cultura global que impulse el reciclaje y reúso de estos residuos alimentarios.

Particularmente, los residuos agroalimentarios ofrecen grandes oportunidades para su aprovechamiento, ya que muchos países cuentan con este tipo de residuos, entre ellos México, garantizando la disponibilidad de su uso como materia prima para diferentes aplicaciones, como la producción de bioplásticos debido al alto contenido de celulosa (Chavan et al., 2018).

En la Tabla 1.1 se resume la producción anual de producción de residuos agroindustrial en México de tallo de maíz, aguacate zanahoria y betabel, los cuales son aplicados en el desarrollo de este proyecto.

Tabla 1.1. Producción de residuos agroindustriales en México de tallo de maíz, aguacate, zanahoria y betabel

| **Producción de residuos agroindustriales en México** | | | |
|---|---|---|---|
| **Producto** | **Residuo generado Anualmente** | **Principales Estados Productores** | **Referencia** |
| Tallo de maíz | 8.1 millones toneladas maíz blanco<br>5 millones de toneladas maíz amarillo | Sinaloa, Jalisco y Estado de México | SEDAGRO 2023 |
| Aguacate | 0.75 millones de toneladas | 84% se produce en Michoacán.<br>Seguido por Jalisco y<br>Estado de México | SEDAGRO 2023 |
| Zanahoria | 99,300 toneladas | Guanajuato, Puebla, Zacatecas y<br>Estado de México | SEDAGRO 2023 |
| Betabel | 2,988 toneladas | Puebla, Jalisco y Baja California<br>Estado de México | SEDAGRO 2023 |

Entre los estudios que se tienen sobre el aprovechamiento de residuos agroalimentarios en la Tabla 1.2 se encuentran los siguientes.

Tabla 1.2 Aprovechamiento de residuos agroalimentarios

| Autor | Residuo | Resumen |
|---|---|---|
| Jayalath et al., 2025 | yuca, maíz y arroz | Desarrollo y caracterización de bioplásticos de gelatina y almidón. Un estudio comparativo de alternativas a base de yuca, maíz y arroz. |
| Velarde et al., 2025 | Gelatina, quitosano extracto de hojas de guayaba | Desarrollo y caracterización de un envase activo de gelatina-quitosano con extracto de hoja de guayaba incorporado para prolongar la vida útil de la carne. |
| A.G. Asikkutlu y M. Yildirim-Yalcin et al., 2025 | Almidón de semilla de aguacate | Optimización de las propiedades mecánicas y de barrera de agua de una película a base de almidón de semilla de aguacate y su aplicación como indicador inteligente de pH mediante la adición de extracto de flor de guisante mariposa azul. |
| Kowser et al., 2025 | Almidón de maíz | Fabricación y caracterización de bioplásticos a base de almidón de maíz para aplicaciones de embalaje |
| Plasencia et al., 2025 | zeína y goma xantana | Desarrollo innovador de mezclas de zeína biodegradables moldeadas por inyección con goma xantana |
| Lopes et al., 2024 | algarrobo y papa | Elaboración de películas de polvo de algarrobo y almidón de papa, para envasar queso y galletas de avena |
| Hendrawati. et al., 2023 | Celulosa de cascara de arroz | Extracción de celulosa de cascara de arroz y su comparación como refuerzo en un bioplástico de almidón de yuca, obteniendo el mejor resultado con 5g de almidón, 1.2g de celulosa, 0.3g de PVA y 0.3g de ZnO |
| Ajayi, V. A., y Lateef, A. et al., 2023 | Cascara de semilla de melón y cascara de maní | caracterización y uso potencial de cascara de semilla de melón y cascara de maní, dándole valor agregado en la economía circular |
| Mohammed et al., 2023 | Sargazo marino | Uso de alginato extraído de sargazo, almidón de papa, celulosa microcristalina y glicerol, obteniendo un bioplástico con buena barrera de agua |
| Dorigato, A., y Fredi, G et al., 2023 | Almidón de papa | comparación de diferentes refuerzos a matrices poliméricas incluyendo almidón, el cual da resultados comparables con otros refuerzos mejorando el porcentaje de elongación |

| | | |
|---|---|---|
| Choudhary et al., 2023 | Agarosa y goma de neem | Obtención de película bioplástica comestible de goma de neem, agarosa, hidroxipatita y sorbitol, fuerza tensil de 53MPa, |
| Heredia-Guerrero et al., 2023 | Chitina | Desarrollo de bioplástico con chitina, y glicerol teniendo las propiedades mecánicas con la formulación 80% y 20% de chitina y glicerol respectivamente |
| Chowdhury et al.,2022 | almidón de Tamarindo, ballas y raíz de licorice | Obtención de bioplástico de semillas de tamarindo, semillas de moras y raíz de licorice, logrando un bioplástico biodegradable |
| Guzman-Puyol et al., 2022 | Celulosa y naringina | Aplicación de naringina y carbo mextil celulosa, la mejor formulación fue de 80:20 de celulosa y naringina, con propiedades de bloqueo de rayos UV |
| Marichelvam et al., 2022 | Almidón de Prosopis Juliflora Plant | Extracto de almidón de planta para desarrollo de bioplástica resistencia tensil de 5.81MPa con la formulación de 10g de almidón, 2 g de grenetina, 1g de ácido cítrico 3g de glicerol y 100 g de agua destilada |
| Shanmathy et al., 2021 | Almidón de Taro | Bioplástico de almidón de Taro reforzado con bentonita, con temperatura de gelatinización del almidón de 75°C al reforzar con bentonita exhibe mejor resistencia y siendo biodegradables |
| Chong et al., 2021 | fibra lignocelulósica de residuos de maíz | Análisis de uso de diferentes partes del maíz, como refuerzo para biocompositos , llegando a la conclusión de que el tallo de maíz presento las mejores propiedades para este uso, mejorando sus propiedades mecánicas |

Particularmente se encuentran en la literatura el aprovechamiento de algunos residuos agroindustriales como el uso de residuos de cáscara y bagazo de zanahoria para la obtención de películas basadas en chitosan, utilizando dos tipos de relleno diferentes, fibras de zanahoria y celulosa microcristalina. Sogut y Cakmak, (2020). Ambos rellenos mejoraron las propiedades mecánicas de las películas de chitosan dependiendo de su concentración.

Otro ejemplo de residuo con un alto potencial de aprovechamiento es el maíz, que es la fuente natural de lignocelulosa más grande del mundo. Los residuos de maíz se usan para producir papel y como refuerzo en plásticos. Chong et al., (2020)

compararon las propiedades del biocompuesto de polipropileno con tallo de maíz y fibra de vidrio contra los polipropilenos, de fibra de bagazo y fibra de vidrio, observando mejoras del 97.92% en la resistencia tensil, 10.4% en la elongación a la ruptura y 91.26% en el módulo de Young.

La remolacha también se ha utilizado como refuerzo de la matriz polimérica, para el Carbocal® es un polietileno de baja densidad que, al mezclarse polietileno con residuos de remolacha, presenta mayor rigidez y, resistencia termo-mecánica manteniendo la estructura polimérica (Suffo et al., 2020).

Las semillas de frutos como el aguacate se consideran uno de los principales subproductos de residuos tras, del procesamiento de la fruta. Estas semillas son una rica fuente de polisacáridos complejos, con un contenido de almidón cercano al 40% (Martins et al., 2022). Asikkutlu y Yildirim-Yalcin, (2025) también estudiaron las semillas de aguacate como fuentes alternativas y no convencionales de almidón.

## 1.4 Aplicaciones de los bioplásticos

La síntesis de bioplásticos es un campo emergente, pero se su uso se está extendiendo en varios sectores, como la medicina (prótesis, hilos de sutura), en alimentación (productos de catering, envases desechables), juguetes, piezas para autos, e incluso en el mundo de la moda. Por ejemplo, Versace cuenta con una línea de ropa, a partir de maíz. Por supuesto, también se utilizan para la producción de bolsas biodegradables.

En la industria de los alimentos, los bioplásticos se emplean principalmente en empaques, envases, recipientes para llevar, vasos, cubiertos, popotes, envoltorios, bolsas y, cajas utilizadas para el almacenamiento, transporte, venta al por menor y servicio de alimentos.

Además, existen nuevas aplicaciones que incluyen soportes y sistemas de liberación de fertilizantes para plantas, fabricación de envases inteligentes, dispositivos biomédicos, sensores, supercondensadores y dispositivos electrónicos (Wic Baena, 2019).

Entre las empresas que producen bioplásticos, se encuentra "Mater-Bi" es un producto desarrollado por "Novamont" a partir de almidón y celulosa, con el cual se producen y comercializan actualmente plásticos biodegradables.
Estos materiales se elaboran a partir de recursos renovables provenientes de plantas y/o animales. Ofrecen una solución conveniente y respetuosa con el ambiente, considerándose una estrategia para reducir las emisiones de dióxido de carbono y la dependencia de recursos fósiles (Bourbia et al.,2023)

# 2. MÉTODO

En la Figura 2.1 se presenta un esquema que expone el método experimental propuesto para la obtención de un bioplástico a partir de residuos agroindustriales. A continuación, se describen las etapas incluidas en dicho esquema.

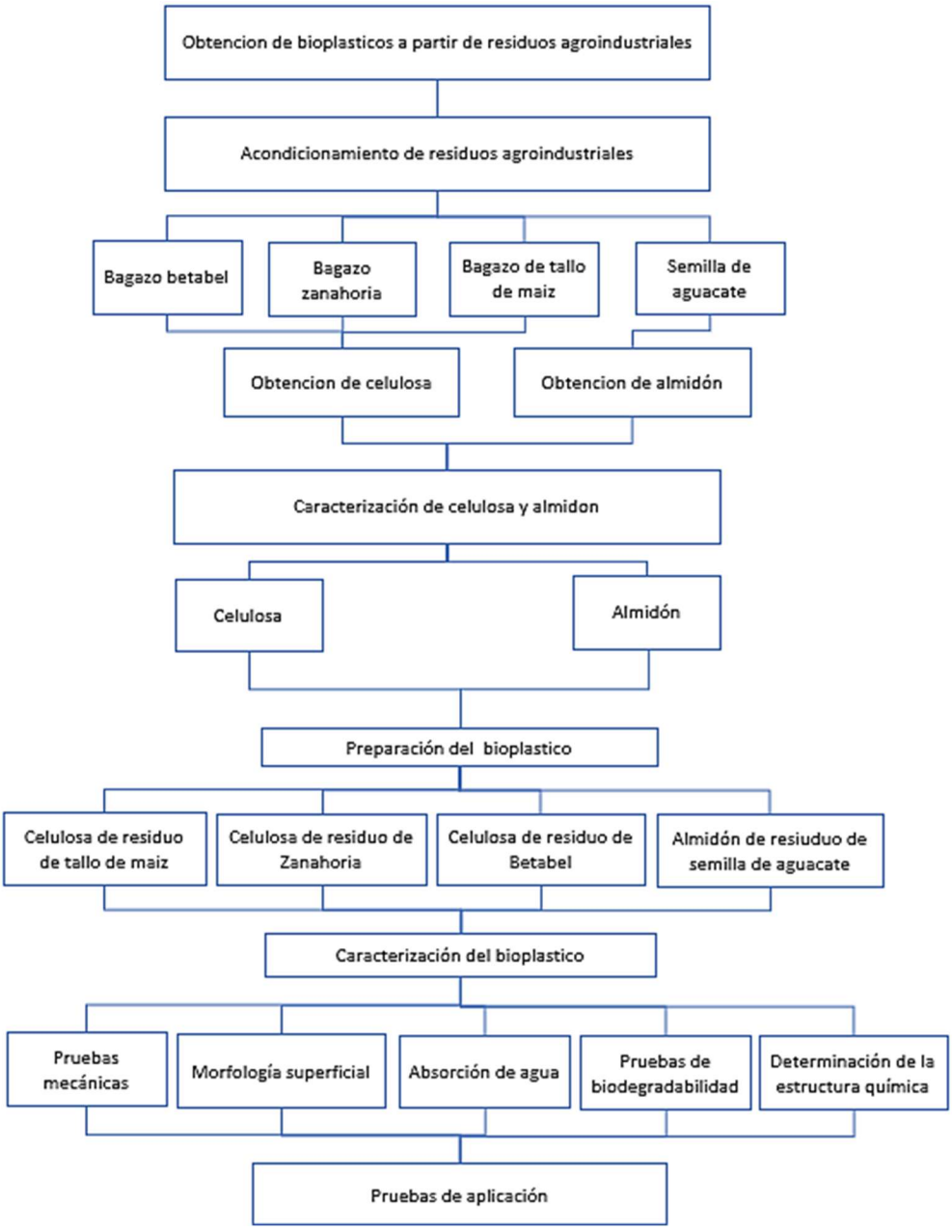



Figura 2.1 Diagrama de flujo del método de investigación

## 2.1 Recolección de residuos industriales alimentarios

Se recolectaron, de forma separada, 10 kg de residuos de bagazo de zanahoria y betabel, así como tallo de maíz y semilla de aguacate, provenientes de industrias dedicadas a la producción de aditivos alimentarios, localizadas en el Estado de México. Los residuos se recolectaron en recipientes de vidrio y llevaron a laboratorio para su uso posterior.

## 2.2 Acondicionamiento y obtención de polvos de residuos agroalimentarios

Los residuos se lavaron con agua destilada para eliminar impurezas y, por último, con agua desionizada. Posteriormente los residuos se escurrieron y se sumergieron en la solución de meta- bisulfito $NaSO_2O_5$ previamente preparada al 1 % p/v durante 48 horas. El tallo de maíz se cortó previamente en trozos pequeños. En el caso de las semillas de aguacate, una vez lavadas se les quitó la cascara café que las cubre, y, posteriormente, se cortaron en laminas finas con ayuda de un cuchillo de acero inoxidable y una tabla para picar, y se sumergieron en la solución de meta-bisulfito durante 48 h. Finalmente, Los residuos se enjuagaron y se escurrieron con ayuda de un colador para sacar la mayor cantidad de agua posible. En las Figuras 2.2-2.4 se muestran imágenes del procedimiento descrito anteriormente.

Figura 2.2 Residuo de betabel y zanahoria, lavado y en solución de meta- bisulfito, residuo de betabel enjuagado y escurrido.

Figura 2.3 Residuo de tallo de maíz cortado, lavado y en solución de meta-bisulfito.

Figura 2.4 Semillas de aguacate peladas, cortadas y en solución de meta- bisulfito.

Una vez lavados, los residuos fueron secados a 50°C en horno de convección Riossa HCF-62 durante 24 horas. Posteriormente se molieron en una licuadora de cuchillas y se tamizaron por separado con un tamiz del 140, obteniendo un tamaño de partícula de 106 micras. Posteriormente, los residuos de betabel y zanahoria fueron almacenados y etiquetados por separado. En la Figura 2.5 y 2.6 se presenta imágenes de los residuos secos y molidos de cada residuo.

Figura 2.5 Muestra el residuo de betabel y zanahoria, secado y residuo de betabel y zanahoria molido y tamizado

Figura 2.6 Residuo de tallo de maíz secado, molido y tamizado

## 2.3 Obtención de celulosa y almidón de residuos agroindustriales

1.Obtención de almidón de semilla de aguacate. Una vez ya acondicionadas las semillas de aguacate, se procedió a sacarlas del meta- bisulfito y enjugarlas con agua desionizada. Luego, se molieron en húmedo con ayuda de un cortador de aspas durante 2 minutos. Posteriormente, la mezcla se tamizó a través de una malla y se dejó sedimentar durante 12 horas.

Transcurrido ese tiempo, se sifoneó el agua, quedando únicamente el almidón sedimentado. Luego, se colocó en una bandeja con papel aluminio y se secó a 50°C en heidolpph inkubator 1000 durante 24 horas. Pasado este periodo, el material se retiró, se sacó y machacó en mortero de cerámica y se tamizó utilizando un tamiz del 140 de partícula de 106 micras. Finalmente, el almidón obtenido fue almacenado y etiquetado como almidón de aguacate. El rendimiento de almidón de semilla de aguacate se calculó según la formula correspondiente.

En las Figuras 2.7-2.9 se presentan imágenes relativas al procedimiento utilizado en la obtención del almidón de semilla de aguacate.

Figura 2.7 Semilla de aguacate enjuago, molido, tamizo y sedimento.

Figura 2.8 Semilla de aguacate sedimentada, sifonada y almidón húmedo

Figura 2.9 Almidón de semilla de aguacate secado, triturado, tamizado y pesado

2. Obtención de celulosa de betabel, zanahoria y tallo de maíz. Una vez acondicionados los residuos agroalimentarios de betabel, zanahoria y tallo de maíz, se aplicó el mismo procedimiento para la obtención de celulosa, descrito a continuación.

Para la hidrolisis alcalina, se preparó una solución de hidróxido de Sodio al 2%. Luego, los residuos secos y en polvo de betabel, zanahoria y tallo de maíz se colocaron por separado en vasos de precipitado. Posteriormente, se agregó la solución de hidróxido de sodio al 2% en cada vaso y los residuos fueron sumergidos

en una solución de hidróxido de sodio 2% 1:10. Los vasos se colocaron en una estufa y la pulpa de betabel, zanahoria y tallo de maíz se llevó a 90°C durante 90 minutos, con agitación constante, como se muestra en la Figura 2.10.

Pasados los 90 minutos, la pulpa se colocó en vaso de precipitado en papel filtro y, con ayuda de un colador, se fue agregando agua desionizada, hasta que la solución resultante tuviera el mismo pH que la solución de hidróxido de sodio. Posteriormente, la pulpa húmeda se colocó en otro vaso de precipitado, para llevar a cabo la hidrolisis ácida, como se muestra en la Figura 2.11.

La hidrólisis ácida se realizó utilizando una solución de ácido sulfúrico al 6%. La pulpa húmeda de betabel, zanahoria y tallo de maíz, obtenida tras la hidrólisis alcalina, se colocó por separado en vasos de precipitado. Luego, se agregó la solución de ácido sulfúrico al 6% en cada vaso. Los residuos fueron sumergidos en una solución de ácido sulfúrico al 6% 1:5 y colocados en una estufa a 90°C durante 60 minutos con agitación constante (Figura 2.12).

Transcurrido ese tiempo, la pulpa se colocó en un vaso de precipitado en papel filtro con ayuda de un colador y nuevamente sobre el papel filtro se colocó la pulpa y se fue agregando agua hasta que la solución resultante tuviera el mismo pH que la solución de ácido sulfúrico (Figura 2.13).

A continuación, la pulpa húmeda se trasladó a otro vaso de precipitado para el proceso de blanqueamiento. Se preparó una solución de hipoclorito de sodio al 2.5%. La pulpa se colocó por separado en vasos de precipitado y se agregó la solución de hipoclorito de sodio al 2.5%. Posteriormente, los residuos fueron sumergidos en una solución de hipoclorito de sodio al 2.5% 1:5 y colocados en una estufa a 90°C durante 15 minutos con agitación constante (Figura 2.14). Luego, la pulpa se filtró nuevamente, agregando en un vaso de precipitado sobre papel filtro con ayuda de un colador, una vez colocada la pulpa en el papel, se fue agregando agua hasta que la solución del agua resultante tuviera el mismo pH que la solución de Hipoclorito de sodio al 2.5% (Figura 2.15). Finalmente, la pulpa húmeda se secó en un heidolpph inkubator 1000 a 50 °C por 12 horas (Figura 2.16). La celulosa

obtenida de betabel, zanahoria y tallo de maíz fue pesada y almacenada, etiquetándola para su posterior uso. En la Figura 2.17 se muestra el material obtenido y en la Tabla 2.1 se resumen los parámetros utilizados en la obtención de celulosa.

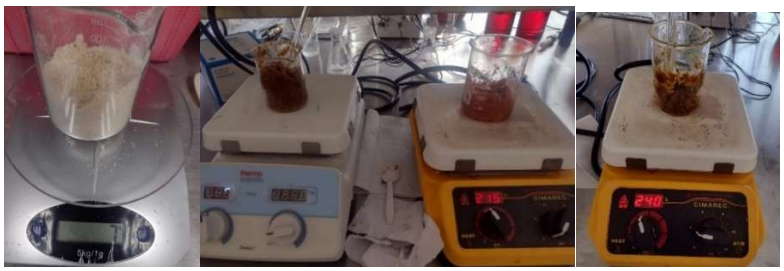


Figura 2.10 Tallo de maíz pesado, residuo de betabel, zanahoria colocada en solución de hidróxido de sodio

Figura 2.11 Residuo de betabel, zanahoria y tallo de maíz enjuagado después de hidrólisis básica

Figura 2.12 Residuo de betabel, zanahoria y tallo de maíz en hidrolisis acida.

Figura 2.13 Residuo de betabel, zanahoria y tallo de maíz enjuagado después de hidrólisis acida.

Figura 2.14 Residuo de betabel, zanahoria y tallo de maíz en blanqueamiento

Figura 2.15 Residuo de betabel, zanahoria y tallo de maíz enjuagado después del blanqueamiento.

Figura 2.16 Celulosa de betabel, zanahoria y tallo de maíz escurrido y puesto a secar

Figura 2.17 Celulosa de betabel, zanahoria y tallo de maíz secado

Tabla 2.1 Condiciones de operación utilizadas para la obtención de celulosa.

| Condiciones de operación | Hidrolisis Básica | Hidrolisis Acida | Blanqueamiento |
|---|---|---|---|
| Temperatura | 90°C | 90°C | 90°C |
| Cantidad de solución | 90 min | 60 min | 15 min |
| Concentración de agentes hidrolizantes y blanqueamiento | 2% | 6% | 2.5% |

Para calcular la eficiencia del almidón y celulosa obtenida en cada caso se utilizó la ecuación (1).

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso de material seco obtenido}}{\text{peso de materia prima seca}} \text{X}100 \quad (1)$$

## 2.4 Obtención de películas compuestas con semilla de aguacate y residuos de zanahoria, betabel y tallo de maíz

Se obtuvieron muestras de bioplásticos como películas mediante diferentes formulaciones de almidón y celulosa a partir de residuos en combinación con agua (250 mL), glicerol (1 mL) y gelatina (1,7 g) (Sethulakshmi et al., 2024). La Tabla 2.2 muestra la matriz de las diferentes combinaciones de componentes para la preparación de las películas.

Tabla 2.2 Composición de las películas obtenidas a base de almidón de semilla de aguacate y celulosa de zanahoria, betabel y tallo de maíz.

| | No | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Muestra | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | Ñ | O | P | Q | R | S | T |
| | Almidón | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.25 |
| Celulosa | Tallo de maíz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0 | 0 | 0.25 |
| | Betabel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0 | 0.25 |
| | Zanahoria | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 0 | 0 | 0.5 | 0.25 |

El procedimiento comenzó con la medición y pesaje de los materiales utilizados, $H_2O$ desionizada, seguido de glicerina $C_3H_8O_3$, grenetina, almidón de semilla de aguacate, celulosa de betabel, celulosa de zanahoria y celulosa de tallo de maíz.

En un vaso de precipitado marca Isolab germany de 500 mL se agregó 250mL de agua desionizada, se calentó en estufa marca termo scientific y agregó un agitador magnético., Luego, se agregó la grenetina, glicerina y la carga correspondiente según la matriz de combinaciones de, celulosa o almidón que se muestra en la Tabla 2.2. Finalmente, se añadió el resto del agua desionizada y, la mezcla del vaso de precipitado se llevó a 90°C, con ayuda de un termómetro de punta metálica.

Una vez alcanzada la temperatura, se continuo la agitación durante 10 min. Posteriormente, la temperatura de la parrilla se redujo y la mezcla se dejó en agitación por 3 minutos adicionales. Luego, se retiró el agitador magnético y, con ayuda de guantes térmicos, se tomó el vaso de precipitado y se vació la mezcla en un molde de silicón de 15 × 12 cm, para su secado en un Heidolph Inkubator 1000 a 22°C durante 18 horas.

Tras el secado del material, se desmoldó y se guardó en bolsas de polietileno resellables de doble cierre y se etiquetó. Como se muestra en la Figura 2.18.

Figura 2.18 Preparación y obtención de la película compuesta

## 2.6 Caracterización de las películas compuestas.

### 2.6.1 Identificación de grupos funcionales

La identificación de los grupos funcionales presentes en el bioplástico se determinó a través de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Las muestras fueron cortadas de 5mm por 5mm de los materiales fabricados y colocados en la placa.

Los espectros FTIR de las muestras fueron medidas en FT / IR Jasco ATR Pro 4X, El análisis se realizó de 4000 a 400 $cm^{-1}$número de onda, y se utilizó el análisis para identificar la presencia de grupos funcionales en los materiales fabricados.

El Jasco ATR Pro 4X es un instrumento de espectroscopía infrarroja que se utiliza para realizar análisis espectroscópicos de muestras sólidas sin realizar pastillas con procesos anticipados para su lectura. Después de unos minutos se obtuvo el espectro del bioplástico como se muestra en la Figura 2.19, para su interpretación se comparó el resultado con espectros de bibliografías y así se podo determinar su composición.

Figura 2.19 Material cortado, analizado, obtención del espectro.

### 2.6.2 Análisis morfológico

Para determinar la morfología y analizar la microestructura, de la superficie del bioplástico fue utilizado microscopía electrónica de barrido (SEM), mediante un Microscopio JEOL (JSM 6510 LV) y JEOL (JSM 6610 LV). Las muestras de los polímeros se cortaron en un tamaño de 0.5 $cm^2$, colocadas en la cinta de carbón y posteriormente en el porta muestras. Se utilizó un recubierto de pulverizado catódico, el cual permitió el paso de los electrones por la muestra evitando el calentamiento, como se muestra en la Figura 2.20. las micrografías resultantes se analizaron para conocer sus propiedades morfológicas, formas, poros, distribución y dimensiones de las fibras. Las muestras se observaron a una distancia de trabajo de 10 mm, 10 kV. voltaje de aceleración y diferentes aumentos, sin revestimiento metálico.

Figura 2.20 Porta muestras, baño de oro, análisis morfológico

### 2.6.3 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas se determinaron mediante el módulo de elasticidad, la resistencia a la tensión y la elongación del material, obtenidas a partir del ensayo de la resistencia a la tracción de los materiales, El ensayo se evaluó, utilizando una máquina universal de pruebas mecánicas marca INSTRON, modelo Instron 3340 (825 University Ave Norwood, MA, 02062-2643, US), según la norma de tracción ASTM D-882 para películas, a una velocidad de 30m/s.

Los materiales fueron medidos y cortados de 2cm por 10 cm dejando 7cm de separación y colocando la cinta a los costados para su agarre en las pinzas de sujeción., Posteriormente se tomó el espesor del polímero de 3 puntos diferentes con ayuda de un calibrador digital de marca mitutoyo, calculando la media, como se muestra en la Figura 2.21.

Los bioplásticos se colocaron en la maquina universal de pruebas mecánicas, sujetándola con las pinzas de sujeción. Se procedió a calibrar el equipo y se corrió la prueba, estirando la película hasta su ruptura, como se observa en la Figura 2.22. Una vez terminada la prueba, se guardaron los datos de prueba y se retiró la película rota, continuando con las pruebas, se realizaron 6 réplicas de cada formulación del material.

Figura 2.21 Corte de los bioplásticos, bioplásticos guardados, bioplásticos colocando la cinta y sacando el espesor.

Figura 2.22 Colocando biomaterial en máquina universal de pruebas mecánicas, tarando el equipo, iniciando prueba, ruptura de bioplástico.

### 2.6.4 Análisis de propiedades térmicas

El estudio de las propiedades térmicas se realizó con las pruebas de calorimetría diferencial de barrido (DSC) utilizando el Analizador DSC 250, y análisis termo gravimétrico (TGA) con el equipo Analizador Termogravimétrico TGA 550 Instrument TA, con rangos desde 0 hasta 400°C para DSC bajo nitrógeno y de 0 a 600°C para TGA. Para DSC, se 2 rampas, siendo la segunda del material resultante de la primera, para TGA, una curva y su derivada.

Primero se abrió la válvula del hidrogeno y encendieron los equipos, se abrió el icono de tríos, conectándose el TGA y DSC desde la computadora.

Para el uso del Analizador termogravimétrico (TGA), se colocó correctamente la charola previamente limpia y tarada, se colocaron las muestras para su análisis, posteriormente se cargó la información correspondiente del material.

El análisis dura aproximadamente 3 horas. Posteriormente se recolecto la muestra analizada de la charola y se procedió a limpiarla con una brocha pequeña de fibra de vidrio. Finalmente se obtuvo el grafico del análisis, como se muestra en la Figura 2.23.

Para el uso de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), se quitaron las tapas, limpiándolas con brocha y sacando la cápsula anterior con ayuda de unas pinzas, coronándola en un estuche especial para su desecho. Posteriormente, se tomó una cápsula nueva con ayuda de las pinzas, pesándola y colocando dentro el material. Una capsula para cada material. Se colocó la tapa y se prensó para sellarla. Luego, se transportó y se colocó en el equipo con ayuda de las pinzas.

En la computadora, se agregó y cargó la información correspondiente al material. El análisis dura aproximadamente 3 horas. Posteriormente, se sacó la cápsula de la muestra analizada. Finalmente, se obtuvo el gráfico del análisis, como se muestra en la Figura 2.24.

Una vez finalizados los análisis en los equipos Analizador Termogravimétrico TGA 550 Instrument TA y Analizador DSC2-02085, se procedió a recopilar los datos, abriendo un archivo nuevo de Excel y guardándolos en una USB previamente limpia y colocados en el PCU, para graficar los datos obtenidos y proceder con su análisis e interpretación.

Figura 2.23 Equipo TGA, limpieza de charola y colocada muestra, charola con muestra a analizar, grafico obtenido.

Figura 2.24 Equipo DSC, pesando muestra, sellando cápsula, clocando capsula en equipo DSC.

### 2.6.5 Ángulo de contacto

El ángulo de contacto se analizó utilizando un goniómetro, colocando la película previamente cortada de 2cm por 2cm, en la placa metálica, frente a la cámara con luz. Se tomó, 1 µL de agua destilada con ayuda de una pipeta y se creó la microgota en la superficie de la película, generando la interfaz sólido-líquido.

El agua, a una temperatura de 18.5 ◦C, en 3 segundos de tiempo de exposición, se tomó la fotografía y guardó. Se realizaron 5 réplicas para cada material. Una vez terminada la prueba, las fotografías se procesaron en el editor de imágenes Geo Gebra como se muestra en la Figura 2.25 el cual se sacó el ángulo formado por la gota de agua en la superficie.

Figura 2.25 Equipo para prueba, gota formada en biomaterial, fotografía, con ángulos calculados.

### 2.6.6 Permeabilidad

Para determinar la permeabilidad, se realizó una prueba de absorción de agua, para la cual las muestras fueron sacadas en un horno durante un tiempo y temperatura específicos, y luego se colocaron en un desecador para que se enfriaran. Inmediatamente después de enfriarse, se pesaron las muestras para conocer su peso inicial. Posteriormente, se colocaron en un vaso de precipitado con agua durante un tiempo determinado, finalmente, se colocaron en un escurridor y se pesaron, para conocer la diferencia al término del periodo y así poder saber la cantidad de agua que absorbió la muestra.
Es importante la obtención del porcentaje de agua que se absorbió porque a mayor absorción de agua, la muestra del material perdería sus propiedades mecánicas (Dewi et al., 2023).

la prueba de solubilidad se determinó de acuerdo con la metodología de Mirpoor et al., (2023) con ligeras modificaciones, las películas se cortaron de 2cm por 2cm y se procedieron a secar en estufa a 105°C durante 24 horas, se dejaron secar y se procedió a tomar su peso y se colocaron en un vaso de precipitado con 30ml de agua desionizada con agitación por 24 horas, Posteriormente se procedió a sacarlas y ponerlas en charolas para su secado por 24 horas a 105°C, una vez pasado el tiempo de secado se procedió a pesarlas para sacar la relación de solubilidad.

$$\text{Solubilidad} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Pes final}}{\text{peso inicial}} \quad \text{X100} \qquad (2)$$

La relación de hinchamiento se determinó como lo describe Mirpoor et al., (2023) las películas se cortaron de 2cm por 2 cm y secaron en un horno a 105°C por 24 horas, pasado el tiempo se pesaron para conocer el punto inicial de la muestra, posteriormente se colocaron en un vaso de precipitado y sumergieron en 30 ml de agua desionizada con agitación a 100 RPM a una temperatura de 25°C por 1 hora.

Pasado el tiempo se drena el agua con un colador y papel filtro. Se quito el agua superficial con papel absorbente, se pesaron las películas nuevamente para determinar la relación de hinchamiento, con la siguiente formula:

$$\text{Hinchamiento} = \frac{\text{Peso final} - \text{Pes inicial}}{\text{peso final}} \text{X100} \quad (3)$$

## 2.6.7 Pruebas de degradabilidad de las películas

a) Degradación por luz y aire. Las muestras de las películas se colocaron en una charola previamente etiquetadas y se colocaron al sol durante dos meses para observar la degradación por rayos UV y aire. Se realizaron tres mediciones para las muestras considerando el valor promedio y el estándar correspondiente. La pérdida de peso se calculó mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Pérdida de peso (\%)} = \frac{\text{Peso Inicial} - \text{Pes Final}}{\text{Peso Final}} \text{X100} \quad (4)$$

b) Degradación por agua, aire y luz. La prueba se realizó por triplicado, colocando cada muestra en un tubo de ensayo con agua desionizada a temperatura ambiente, dejándolos en un porta muestras destapados. El tiempo que tarde el biomaterial en degradarse o descomponerse se registró y se observaron los cambios en su apariencia durante un periodo de tiempo (Azmin et al., 2020).

c) Degradación por agua y luz. Las muestras se colocaron en tubos de ensayo con agua desionizada a temperatura ambiente, dejándolos en un porta muestras tapados.

d) Degradación biológica. La degradación biológica de las películas se midió a los 28 días, analizándose las películas cada 7 días (Chowdhury et al., 2022). Para la prueba las películas se cortaron en secciones de 2 x 2 cm, se pesaron y se colocaron bajo condiciones simuladas de compostaje (Marichelvam et al., 2022). El compost se preparó con aserrín (40% en peso), excrementos de conejo (30% en peso), compost maduro (10% en peso), residuos de almidón de maíz (10% en peso), sacarosa (5% en peso), residuos de aceite de maíz (4% en peso) y urea (1% en peso) (Plasencia et al., 2025). Para el análisis de las películas compuestas, la muestra se lavó, secó y pesó. Posteriormente, se calculó la pérdida de peso utilizando la ecuación (4)

## 2.7 Pruebas de aplicación de las películas en forma de bolsa

Las películas A - T se utilizaron como envoltura de queso manchego para estudiar su aplicación. La prueba incluyó el uso de bolsa comercial (polietileno) (PE). Se colocó un queso dentro de las películas y el PE posteriormente se sellaron. Las muestras de queso se almacenaron en una cámara frigorífica (4 °C) y a temperatura ambiente (23-28 °C). La capacidad de conservación de las películas se evaluó mediante cambios en el peso del queso, registrándose el peso inicial y final durante 21 días de almacenamiento para obtener el comportamiento cinético, como lo indica Lopes et al., (2024) en sus películas hechas de almidón de papa, y Algarrobo.

# 3 RESULTADOS

## 3.1 Obtención de celulosa y almidón de residuos industriales

En la Figura 3.1 Se presentan imágenes de polvos de residuos industriales secos de betabel, zanahoria, tallo de maíz y almidón de semilla de aguacate En la Tabla 3.1 se presentan la celulosa y almidón de los polvos de residuos industriales y sus rendimientos.

Figura 3.1 Polvos de residuos industriales de betabel, zanahoria, tallo de maíz y almidón de semilla de aguacate.

Tabla 3.1 Eficiencia de la extracción de celulosa y almidón

| Residuo | Extractivo | Eficiencia | | Imagen | Eficiencia | Referencia |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Betabel | Celulosa | 16% | 24% | | 37% | Latorre et al., (2013), esta diferencia se puede atribuir a que en este proyecto se está trabajando con un resido y no el betabel completo. |

| Residuo | Obtención | Eficiencia | | Imagen | Eficiencia | Referencia |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Zanahoria | Celulosa | 14.60% | 25% | | 33.17% | Sogut y Cakmak et al., (2020) esta diferencia se puede atribuir a que en este proyecto se está trabajando con un resido y no con la zanahoria completa |
| Tallo de maíz | Celulosa | 25% | 52% | | 40% | Reddy y Yang et al., (2005). |
| Semilla de aguacate | Almidón | 25.07% | 25.07% | | 19.54% | Martins et al., (2022) |

## 3.2 Caracterización de residuos industriales (celulosa y almidón)

### 3.2.1 Identificación de grupos funcional de la celulosa

En la Figura 3.2 se presenta el espectro FTIR de las celulosas de betabel (CB), zanahoria (CZ) y tallo de maíz (CTM).

En la Tabla 3.2 se encuentran los grupos funcionales de la celulosa que fueron identificados de acuerdo con Salim et al., (2022), indicando 6 picos característicos que confirman que el producto obtenido es la celulosa.

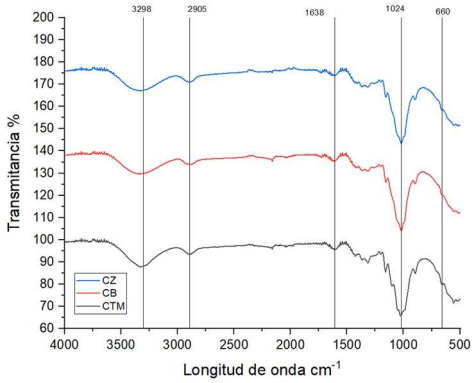



Figura 3.2 Espectros IR de celulosas de tallo de maíz (CTM), betabel (CB), zanahoria (CZ)

Tabla 3.2 Grupos funcionales de la celulosa de betabel, zanahoria y tallo de maíz.

| **longitud de onda $cm^{-1}$** | | | **Clase funcional** | **Asignación** |
|---|---|---|---|---|
| **Celulosa betabel** | **Celulosa zanahoria** | **Celulosa tallo de maíz** | | |
| 660 | 660 | 660 | Grupo carbonilo de celulosa | CH |
| 1024 | 1024 | 1024 | Carboxilo celuloso | C-O-H |
| 1449 | 1449 | 1449 | Alqueno de celulosa | $CH_2$ |
| 1638 | 1638 | 1638 | Hidroxilo Agua | H-O-H |
| 2905 | 2905 | 2905 | Celulosa amorfa/grupo metilo | C-H |
| 3298 | 3298 | 3298 | Hidroxilo / grupo fenólico | OH |

Las diferencias de los picos en las distintas celulosas obtenidas fueron mínimas como lo fueron el segundo pico, indicando la celulosa amorfa, en el último pico, señalando el carboxilo celuloso. Los demás picos fueron semejantes. Salim et al., (2022) presentó el espectro IR de *Leucaena leucocephala*, indicando los grupos funcionales de la celulosa. Las longitudes de onda de la celulosa fueron semejantes a las de betabel, zanahoria y tallo de maíz.

### 3.2.2 Identificación de grupos funcionales del almidón

En la Figura 3.3 se presenta el espectro IR del almidón de semilla de aguacate.

En la Tabla 3.3 se encuentran los grupos funcionales del almidón de semilla de aguacate que fueron identificados de acuerdo con Araújo et al., (2020), indicando 6 picos característicos que confirman que el producto obtenido es almidón de semilla de aguacate.

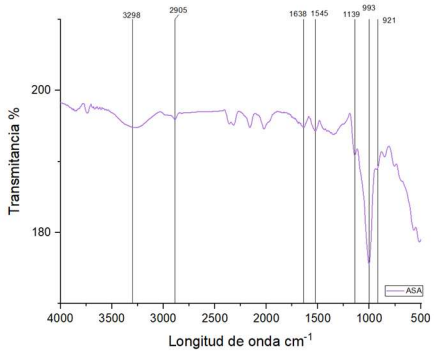



Figura 3.3 Espectro IR de almidón de semilla de aguacate

Tabla 3.3 Grupos funcionales del almidón de semilla de aguacate.

| **longitud de onda $cm^{-1}$** | **Grupo Funcional** | **Asignación** |
|---|---|---|
| 921 | Carbohidratos “huella dactilar” del Almidón | -OH y -CH CO |
| 993 | Alqueno | C=C |
| 1139 | Alcano | C=N |
| 1638 | Agua | $H_2O$ |
| 2905 | Metano | C-H |
| 3298 | Glucosa | CH y OH |

De acuerdo con Araújo et al., (2020). El almidón tiene dos regiones características en el espectro, la vibración de estiramiento -OH y -CH de la glucosa unidad, 3650–3000 $cm^{-1}$ y la región de las principales bandas de adsorción o región de vibraciones de carbohidratos entre 1200 y 800 $cm^{-1}$, conocida como región de huellas dactilares. confirmando que nuestra obtención si es almidón.

En el trabajo realizado por Araújo et al., (2020) se muestra el espectro IR del almidón de semilla de aguacate, el cual coincide con los grupos funcionales encontrados en este trabajo.

### 3.2.3 Análisis termogravimétrico de las celulosas

En la Figura 3.4 se encuentra cambios del termograma de celulosa de betabel. En la Tabla 3.4 se encuentran los cambios de fase de las celulosas que fueron identificados de acuerdo con Raza et al., (2022) indicando, temperatura inicial y la final, pérdida de masa y compuesto volátil a diferente temperatura de celulosa de betabel.

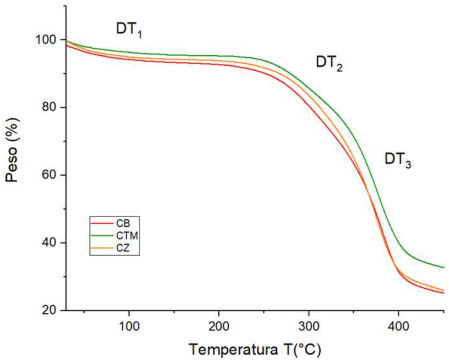



Figura 3.4 Termograma de celulosas de tallo de maíz, betabel y zanahoria que va de los 20°C a los 400°C

Tabla 3.4 Pérdida de masa observada a diferente temperatura de las celulosas.

| Muestra | $DT_1$/°C | $DT_2$/°C | $DT_3$/°C |
|---|---|---|---|
| **CTM** | 109.3 | 224.2 | 356.3 |
| **CB** | 105.38 | 228.6 | 400.6 |
| **CZ** | 92.36 | 236.3 | 393.5 |

En la primera etapa las celulosas pierden agua entre 92.36-109.3 °C, la segunda etapa ocurre en el rango de 224.2-236.3 °C en el cual empieza el punto de degradación de la deslignificación, con pérdida de lignina y hemicelulosa, así como monóxido y dióxido de carbono, llegando hasta 356.3-400.6°C, siendo la tercera etapa, donde la celulosa se transforma en carbón, después de esta última etapa se atribuye a la perdida, quedando únicamente carbón negro, lo cual se resumen en la Tabla 3.4 confirmándose la perdiendo de masa y el punto de degradación de las celulosas.

Comparado la celulosa de betabel, zanahoria y tallo de maíz con celulosa de palma que estudió Raza et al., (2022), los autores encontraron que esta se degrada en 350°C. López et al., (2020) obtuvo celulosa de la caña, indicando que se degrada a 300°C. Charoensopa et al., (2024) realizo extracción de nano celulosa del residuo de fibra de bagazo de caña de azúcar indica que la degradación de la celulosa ocurre a (229–344 °C)

### 3.2.4 Análisis termogravimétrico del almidón

En la Figura 3.5 se presenta el termograma del almidón de semilla de aguacate. En la Tabla 3.5 se presentan los cambios de fase del almidón de semilla de aguacate, identificados de acuerdo con Liu et al., (2019)

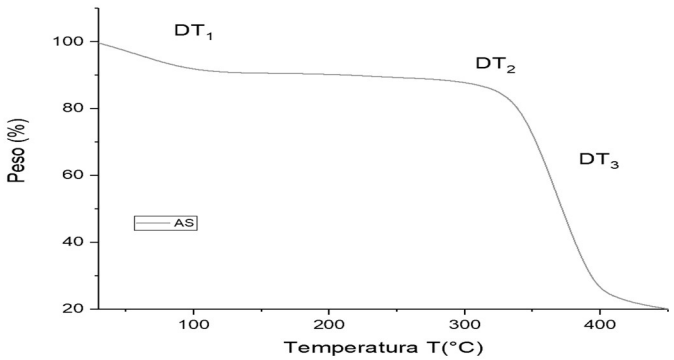



Figura 3.5 Termograma de almidón de semilla de aguacate que va de los 20°C a los 400°C.

Tabla 3.5 Pérdida de masa a diferente temperatura de almidón de semilla de aguacate.

| Muestra | $DT_1$ | $DT_2$ | $DT_3$ |
|---|---|---|---|
| **Almidón de Semilla de aguacate** | 116.4 | 301.6 | 402.6 |

El almidón de semilla de aguacate pierde agua en 116.4°C, según Martins et al., (2022), cuanto mayor sea la pérdida en la primera etapa, más húmeda será la muestra, a 301.6°C empezó el punto de degradación, perdiendo a la amilosa, amilopectina, dióxido y monóxido de carbono. La tercera fase ocurre hasta 402°C, en esta última etapa es atribuida a la perdida, quedando únicamente carbón negro, lo, cual se resumen en la Tabla 3.5 confirmándose la perdiendo de masa y el punto de degradación del almidón de semilla de aguacate.

Liu et al., (2019) incluyó el termograma del almidón de papa a diferentes velocidades de calentamiento, encontrando temperaturas similares de pérdida de masa.

### 3.2.5 Calorimetría diferencial de barrido de las celulosas

En la Figura 3.6 se presenta el termogramas de la celulosa de betabel, zanahoria y tallo de maíz.

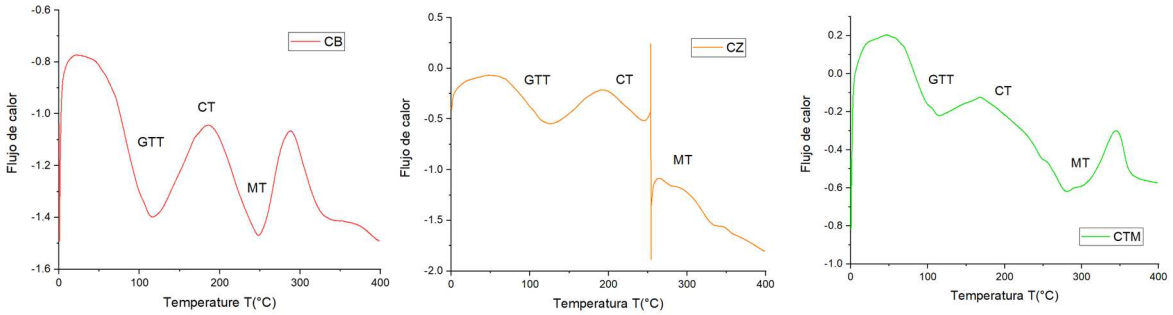



Figura 3.6 Termogramas de celulosas que va de los 0 °C a los 400°C.

Tabla 3.6 Termogramas DSC de celulosas.

| DSC<br><br>Muestra | Temperatura de transición vítrea<br><br>GTT | Temperatura de cristalización<br><br>CT | Temperatura de Fusión<br><br>MT |
|---|---|---|---|
| **CTM** | 84.4 | 167.1 | 280.0 |
| **CB** | 81.89 | 185.5 | 248.6 |
| **CZ** | 62.2 | 191.6 | 253.5 |

En el termograma de celulosa de betabel se muestra la temperatura de transición vítrea, que ocurre de 62.2-84.4°C y es endotérmico. El siguiente pico corresponde a la temperatura de cristalización se encuentra la temperatura de cristalización de 167.1-191.6°C siendo endotérmica. En 248.6-280 °C se encuentra la temperatura de fusión.

El termograma de celulosa comercial de sisal fue reportado por Morán et al., (2008), indicando una temperatura alrededor de cristalización de 330.5°C.

### 3.2.6 Calorimetría diferencial de barrido del almidón de semilla de aguacate

En la Figura 3.7 se presenta termograma del almidón de semilla de aguacate.

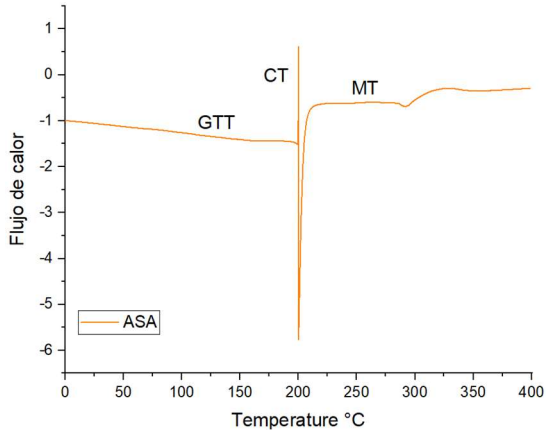



Figura 3.7 Termograma de almidón de semilla de aguate que va de los 0 °C a los 400°.

Tabla 3.7 Termogramas DSC de almidón de semilla de aguacate

| DSC<br><br>Muestra | Temperatura de transición vítrea<br><br>**GTT**/°C | Temperatura de cristalización<br><br>**CT**/°C | Temperatura de Fusión<br><br>**MT**/°C |
|---|---|---|---|
| **ASA** | 82.4 | 189.9 | 200.2 |

En el termograma de almidón de semilla de aguacate, podemos encontrar que la temperatura de transición vítrea ocurre a 82°C, y es endotérmica. Se observa que en 189.9°C se encuentra la temperatura de cristalización, la cual es endotérmica. Y que a 200.2°C se indica la temperatura de fusión del almidón, que es endotérmica.

Malki et al., (2023) reporta en el almidón de arrurruz obtuvo una temperatura de inicio (GTT) a 75,02 °C, y reporto una temperatura pico (CT) de 77,95 ◦C y por último una temperatura de conclusión (MT) de 82,43 °C. E indica que la temperatura de inicio describe la estabilidad de los gránulos de almidón.
Liu et al., (2019) obtuvo en su almidón de papa con una temperatura de transición vítrea de 83.7 °C y muy similar a la temperatura de transición vítrea de aguacate extraído en este trabajo. En el termograma de almidón de semilla de aguacate, se observan las transiciones endotérmicas y exotérmicas, todas ocurren por encima de 80°C, que es temperatura máxima, a la que se somete el almidón para la fabricación de las películas, manteniendo sus propiedades fisicoquímicas.

### 3.2.7 Morfología de celulosa de residuos de betabel, zanahoria y tallo de maíz y almidón de semilla de aguacate

La Figura 3.8 muestra la morfología superficial mediante micrografías SEM de los materiales de la película correspondientes a (a) almidón de semilla de aguacate, (b) celulosa de tallo de maíz, (c) celulosa de remolacha, (d) celulosa de zanahoria.

La micrografía del almidón de semilla de aguacate fue similar a la de Araújo et al., (2020); Dios-Avila et al., (2022); Martins et al., (2022), exponiendo gránulos típicos de forma elíptica, libres de poros, lo que podría ser una característica derivada de su origen vegetal.

La celulosa de tallo de maíz expuso fibras alargadas presenta una alta rugosidad superficial con grietas longitudinales. La micrografía de celulosa de remolacha presenta una apariencia irregular y rugosa (Sogut y Cakmak et al., 2020). La celulosa de zanahoria presenta una superficie más lisa y uniforme Hendrawati et al., (2023). Se observa que, tras completar la hidrólisis, se obtiene celulosa pura (Morán et al., 2008).

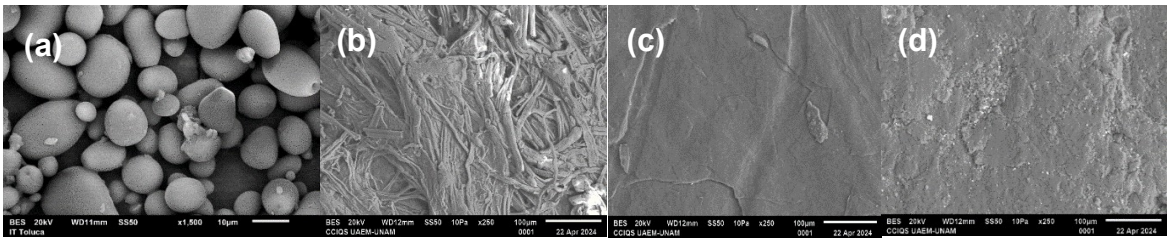



Figura 3.8 Micrografías de materiales a diferentes aumentos. (a) Almidón de semilla de aguacate (X1500), (b) Celulosa de tallo de maíz (X250), (c) Celulosa de remolacha (X250), (d) Celulosa de zanahoria (X250).

## 3.3 Obtención y caracterización de películas compuestas de almidón de semilla de aguacate y celulosa de residuos de zanahoria, betabel y tallo de maíz

En la Figura 3.9 se presentan imágenes de películas compuestas de la formulación base (A), así como de otras formulaciones con distintas cargas de almidón de semilla de aguacate, celulosa de tallo de maíz, celulosa de betabel y celulosa de zanahoria.

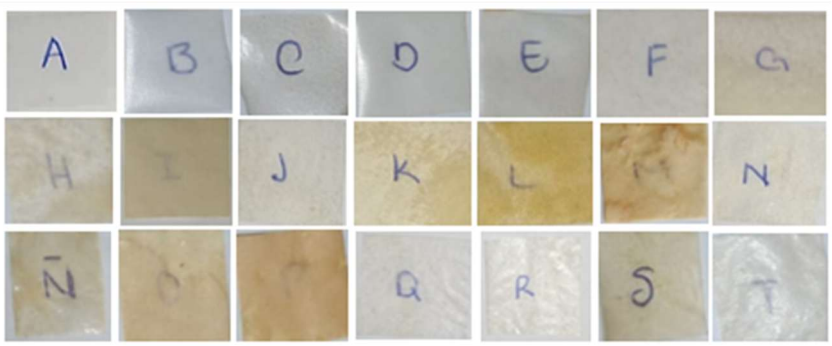



Figura 3.8 Imágenes de los bioplásticos obtenidos, a diferentes cargas.

Las películas con almidón presentaron una apariencia transparente (B, C, D, E), mientras que las que contenían celulosa (F, GH, I, JK, L, M, N, Ñ, O, P) mostraron materiales opacos en proporción creciente con la celulosa. A su vez, las películas con almidón y celulosa (Q, R, S, T) mostraron un predominio de almidón; sin embargo, las películas con celulosa de zanahoria y remolacha mostraron opacidad debido a la presencia de celulosa.

### 3.3.1 Identificación de grupos funcionales de las películas compuestas.

La Figura 3.9 muestra los espectros FTIR de las películas (a) A (control) y E (con almidón); (b) A (control), I (con celulosa de tallo de maíz), M (con celulosa de remolacha), P (con celulosa de zanahoria), (c) A (control) y T (con almidón y celulosa). Los espectros presentan las bandas principales correspondientes al almidón y la celulosa.

La Tabla 2.8 presenta los principales grupos químicos del almidón de semilla de aguacate y las celulosas de tallo de maíz, remolacha y zanahoria, incluyendo los grupos de las películas que contienen estos componentes.

.

Tabla 3.8 Grupos funcionales del almidón y la celulosa y su presencia en películas

| Grupos / Muestra | OH | CH | CH | C-O-C | C-O-H | C-O C-C | CO | CH | CH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Almidón de semilla de aguacate | 3298 | 2905 | - | - | 1139 | 1008 | 921 | - | - |
| Celulosa | 3302 | 2905 | 1449,1545 | 1025 | - | - | - | 855 | 660 |
| película I, M, P | 3302 | 2905 | 1449, 1545 | 1025 | - | - | - | 855 | 660 |
| película E | 3298 | 2941 | - | - | 1133 | 1008 | 921 | - | - |
| película T | 3302 | 2905 | 1449, 1545 | 1025 | - | - | - | 855 | 660 |

El almidón contiene numerosos grupos hidroxilo (OH); el espectro FTIR del almidón de semillas de aguacate manifestó grupos OH a 3692 $cm^{-1}$, mientras que el almidón contiene enlaces C-O; la presencia de este grupo también se observa en el espectro FTIR, manifestándose como C-O-C y C=O en diferentes regiones. Los enlaces C-O en el anillo de glucosa muestran señales alrededor de 921 $cm^{-1}$, mientras que C-O-C se observa a 1025 $cm^{-1}$. (Muyonga et al., 2004; Araújo et al., 2020; Amin et al., 2019; Kowser et al., 2025).

Además de los enlaces OH y C-O, también se describe en 855 la presencia de enlaces C-H, lo que indica la presencia de vibraciones en el anillo de glucosa. (Araújo et al., 2020; Kowser et al., 2025)

La estructura química de la celulosa (($C_6H_{10}O^-$) n), como polímero lineal, es un polisacárido no ramificado compuesto por largas cadenas de unidades de glucosa unidas por enlaces glucosídicos beta (1→4). Por lo tanto, los grupos principales son OH, CH y CO. Los grupos OH de la celulosa se observan a 3300 $cm^{-1}$, el CH completo se encuentra en los tres rangos de 1500-1400 $cm^{-1}$, 1100-1000 $cm^{-1}$ y 900-800 $cm^{-1}$, y el CO se observa a 1024 $cm^{-1}$. (Sogut y Cakmak, 2020; Zhang et al., 2024; Raza et al., 2022).

A su vez, la película E que contiene almidón muestra grupos de almidón similares, mientras que las películas I, M y P que contienen celulosa de tallo de maíz, remolacha y zanahoria, respectivamente, presentan un espectro similar de celulosas.

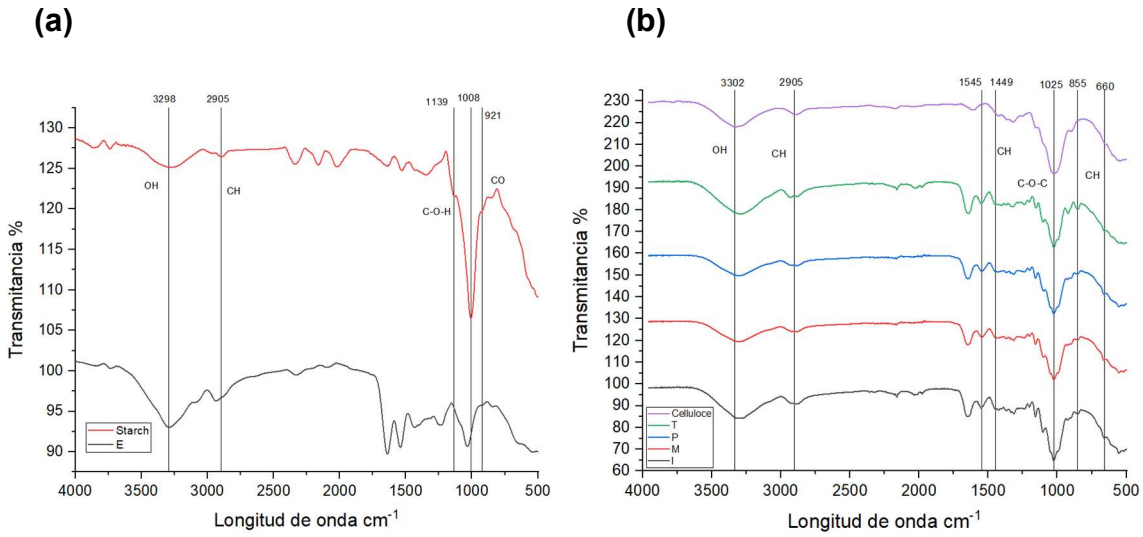



Figura 3.9 Espectro IR de las películas a diferentes cargas de almidón de semilla de aguacate y celulosas.

### 3.3.2 Análisis termogravimétrico de las películas

La Tabla 3.10 muestra el comportamiento térmico mediante análisis de TGA de las películas seleccionadas A, E, I, M, P y T. que consta de tres etapas principales que se muestran en la Figura 3.12. Estas películas se seleccionaron por presentar cambios significativos en su estructura, conteniendo la mayor proporción (2 g) de almidón o celulosa, o almidón y celulosa de todos los componentes de los residuos (0,25 g de cada uno).

El análisis TGA implica temperaturas de degradación (DT) con cambios de masa, que se indican como: primero, cambio de masa por pérdida de agua ($DT_1$), segundo, cambio por pérdida de masa de material ($DT_2$) y tercero, cambio por pérdida de masa total y residuos carbonosos ($DT_3$).

La película A mostró las temperaturas de degradación más bajas; sin embargo, las películas E-T aumentaron estos parámetros. El rango de $DT_1$ de las películas E-T fue de 83,9 a 114,5 °C.

Específicamente, las películas I, M y P, que contienen celulosa de tallo de maíz, remolacha y zanahoria, respectivamente, mostraron el $DT_1$ más alto, lo que indica que estas películas requieren una temperatura alta para la evaporación del agua. Debido a su estructura, retienen más agua. Sin embargo, las películas E y T, que contienen almidón, mostraron valores de $DT_1$ más bajos que las películas I, M y P.

A su vez, el rango de $DT_2$ para las películas E-T fue de 139 a 217 °C, donde la película P, que contiene celulosa de zanahoria, ofreció una resistencia superior a la pérdida de masa. Por el contrario, las películas E y T con almidón, y almidón y celulosas, mostraron el $DT_2$ más bajo, lo que resultó en películas con una rápida formación de fase gaseosa y pérdida de masa. Este resultado se atribuyó a la presencia de almidón en la película E y a la debilidad de la película T, debido a la multicomponente de almidón y celulosas. La $DT_3$ de las películas se presentó en el rango de 270-345,9 °C. Las películas I y M, con celulosa de tallo de maíz y remolacha, respectivamente, presentaron la temperatura más alta de pérdida de masa total. Por el contrario, las películas P y T, con celulosa de zanahoria y almidón, y celulosas, respectivamente, presentaron la DT3 más baja, debido a que la celulosa de zanahoria presentó una estructura débil, mientras que la estructura del almidón y la celulosa también fue vulnerable. Se observa en la Figura 3.10

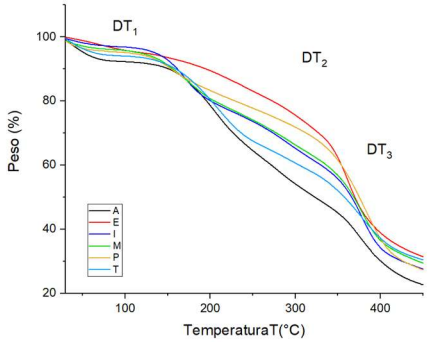



Figura 3.10 TGA del desarrollo de películas de almidón de semilla de aguacate y celulosas.

Tabla 3.9 Fases de temperatura de las películas desarrolladas de celulosas y almidón de semilla de aguacate.

| Muestra | $DT_1$/°C | $DT_2$/°C | $DT_3$/°C |
|---|---|---|---|
| **A** | 70.91 | 154.9 | 270 |
| **E** | 95.64 | 149.05 | 332.9 |
| **I** | 114.5 | 192.2 | 345.9 |
| **M** | 101.4 | 201.25 | 340.68 |
| **P** | 100.2 | 217.5 | 313.3 |
| **T** | 83.9 | 139.0 | 251.3 |

Los valores de TGA de las películas fueron similares a los encontrados por Yun et al., (2023) para películas a base de polvo de cáscara de cítricos. Su primera etapa de descomposición ocurrió alrededor de los 100 °C, atribuida a la pérdida de agua; la segunda etapa (203-211 °C) correspondió a la descomposición de los componentes primarios de la película: glicerol, proteínas, pectina, celulosa y alginato de sodio. La tercera etapa se produjo por encima de los 350 °C y se asoció con la degradación oxidativa gradual de residuos carbonosos y lignina.

Jridi et al.,(2024) obtuvo una temperatura de transición máxima de 79°en sus películas a base de gelatina de pescado, pectina y cascara de naranja, sin embargo Morán et al., (2008) reportó datos de TGA de celulosa y nanocelulosa extraídas de fibras de sisal, reporta una pequeña pérdida de peso en el rango de 25 a 150 °C debido a la evaporación de la humedad de los materiales o compuestos de bajo peso molecular, seguida de una segunda descomposición que comienza alrededor de los 200 °C y una tercera fase que ocurre a 305 °C. Lopes et al., (2024) reporta resultados de TGA (80,4–185,7 °C): la primera fase, a 97,1–251,5 °C, corresponde a la segunda fase, y a 300 °C, a la tercera fase, en sus película de almidón de papa.

### 3.3.3 Calorimetría diferencial de barrido de las películas

La Tabla 3.10 muestra el comportamiento térmico mediante análisis de DSC de las películas seleccionadas A, E, I, M, P y T. Estas películas se seleccionaron por presentar cambios significativos en su estructura, conteniendo la mayor proporción (2 g) de almidón o celulosa, o almidón y celulosa de todos los componentes de los residuos (0,25 g de cada uno). El análisis DSC incluye la temperatura de transición vítrea (GTT), la temperatura de cristalización (TC) y la temperatura de fusión (TM).

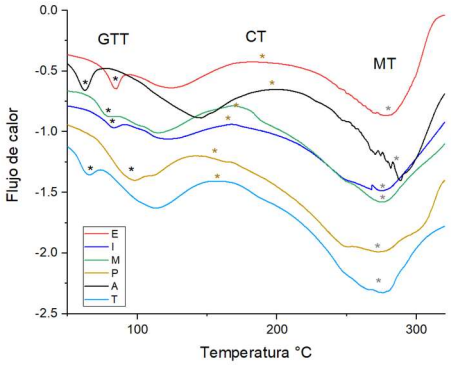



Figura 3.11 Termograma de las películas A, E, I, M, P y T.

Tabla 3.10 Faces de las temperaturas

| DSC película | Transición Vítrea GTT/°C | Cristalización CT/°C | Fusión MT/°C |
|---|---|---|---|
| **A** | 61.5 | 197 | 285 |
| **E** | 84.7 | 183.1 | 278 |
| **I** | 82.9 | 166.0 | 276.6 |
| **M** | 78.07 | 168.4 | 274.1 |
| **P** | 71.3 | 142.8 | 250 |
| **T** | 64.63 | 155.6 | 273 |

La película A mostró las temperaturas de degradación más bajas; El comportamiento térmico mediante análisis DSC, las películas E-T registraron diferentes valores de GTT, CT y MT.

La GTT en las películas E-T aumentó en comparación con la película A, bajo el siguiente comportamiento: E > I > M > P > T, lo que indica que estas películas cambian de un estado vítreo a un estado gomoso a temperaturas más altas que la película A. Sin embargo, la GTT en la película T, que contiene almidón y celulosas, mostró un valor similar al de la película A, debido a la integración de almidón, celulosa o ambos componentes, que originalmente era una película susceptible. Por el contrario, la temperatura de transición vítrea (TC) en las películas E-T disminuyó en comparación con la película A, lo que indica que la integración de almidón y celulosa redujo la temperatura de un estado líquido o amorfo a un estado cristalino. La TC más baja se registró en la película P, que contenía celulosa de zanahoria.

A su vez, la temperatura de transición vítrea (MT) también disminuyó en la película A. En este caso, la película P registró la MT más baja, lo que demuestra que a 273 °C el material pasa de estado sólido a líquido. Se observa en la Figura 3.13.

Liu et al., (2020) informaron datos de cristalización a 100 °C, y el punto de fusión es de 110 °C para su película de almidón de patata.

### 3.3.4 Morfología de las películas

La Figura 3.13 muestra la morfología superficial mediante micrografías SEM de las películas correspondientes. La película C (con almidón), G (con celulosa de tallo de maíz), K (con celulosa de remolacha) y Ñ (con celulosa de zanahoria). a diferentes aumentos.

Las películas presentan diferentes imágenes superficiales, dependientes de la composición del material (Raza et al., 2022). El almidón proporciona una superficie uniforme y homogénea en la película C, mientras que las micrografías que contienen celulosas G, K y Ñ presentan una superficie rugosa. (Feijoo et al., 2023; Raza et al., 2022).

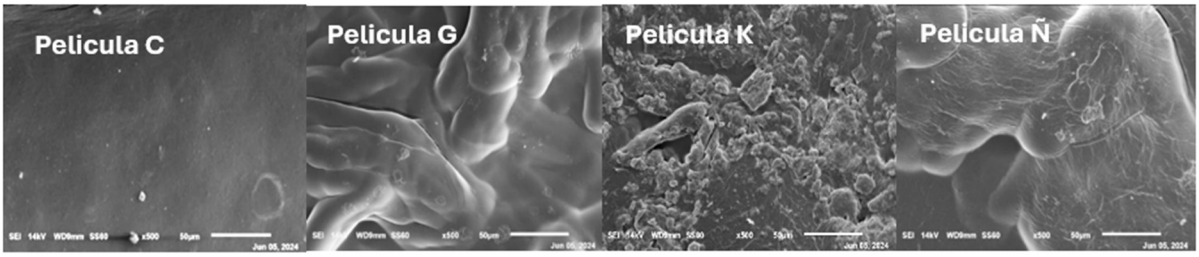



Figura 3.12 a) Micrografía de películas de diferentes muestras a x250 aumentos. película C, G, K y Ñ.

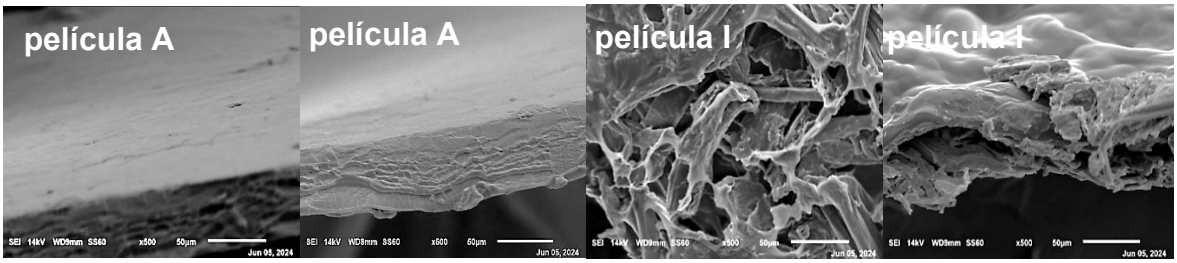



Figura 3.13 a) Micrografía de películas de diferentes muestras a x500 aumentos. película A y I, frontal y transversal.

La Figura 3.14 se muestran las micrografías SEM en sección trasversal y frontal, de la película (A) sin carga llamada matriz, y las películas con carga de celulosa de tallo de maíz I con 2g. La adición de la celulosa de maíz a la matriz hizo que se notara mucho más la presencia de celulosa, y a medida que se aumenta la carga, la estructura se percibe porosa y menos uniforme, resaltando las fibras características de la celulosa de tallo de maíz. Ibrahim et al., (2019); Feijoo et al., (2023). La comprensión de las propiedades estructurales de los materiales compuestos depende en gran medida de la morfología de las fibras (Raza et al., 2022).

En general, se observó una dispersión uniforme e interacciones polímero-fibra coherentes en las micrografías, lo que podría atribuirse a la naturaleza hidrofílica similar tanto de la matriz como del refuerzo. (Ibrahim et al., 2019).

### 3.3.5 Ángulo de contacto.

La Figura 3.15 muestra el ángulo de contacto para películas de bioplásticas. De acuerdo con Olarte-Paredes et al., (2021) el ángulo de contacto es hidrofílico si este es menor 90°, y si es mayor a 90° el ángulo de contacto se considera hidrofóbico.

La película A (control), que presentó propiedades hidrofílicas (83°), en cuanto a las películas obtenidas con almidón de semilla de aguacate y celulosa de tallo de maíz, remolacha y zanahoria mejoraron sus propiedades hidrofóbicas, lo cual es esencial para sus aplicaciones, ya que el principal obstáculo de los bioplásticos es la absorción de agua y la rápida solubilidad en ambientes acuosos.

Según los datos, las películas altamente hidrofóbicas se encontraban en el siguiente orden: T > Q > I > H > M > L > F, con un rango de exposición del ángulo de contacto de 110–123°. Esto indicó que estas películas absorberían menos humedad ambiental. La hidrofobicidad de la película T se asoció con la composición, el contenido y las interacciones gelatina-almidón-celulosa. En la película Q, las interacciones del almidón y la celulosa del tallo de maíz podrían contribuir a la hidrofobicidad. A su vez, las películas I y H contienen celulosa del tallo de maíz, lo que confirma que la presencia de celulosa del tallo de maíz es la principal causa de la hidrofobicidad. Las películas M y L contienen celulosa de remolacha; Por lo tanto, el resultado podría estar asociado a la celulosa de remolacha. Las demás películas con almidón y celulosa de zanahoria presentan la menor hidrofobicidad.

El estudio previo sobre los ángulos de contacto indicó que esta característica depende de la composición de los materiales. Sangsawang et al., (2025) demostró que las películas de metalopolímero de vanadio (fabricadas con almidón, quitosano y sumergidas en sal de vanadio) exhibieron propiedades hidrofóbicas, resultando en ángulos de contacto de hasta 103°. A su vez, Mroczkowska et al., (2024) encontraron valores similares a los reportado en este estudio, en sus películas

hechas de almidón de papa, gelatina y cutina extraída de la cáscara y residuos de tomate, teniendo una hidrofobicidad (superior a 90°).

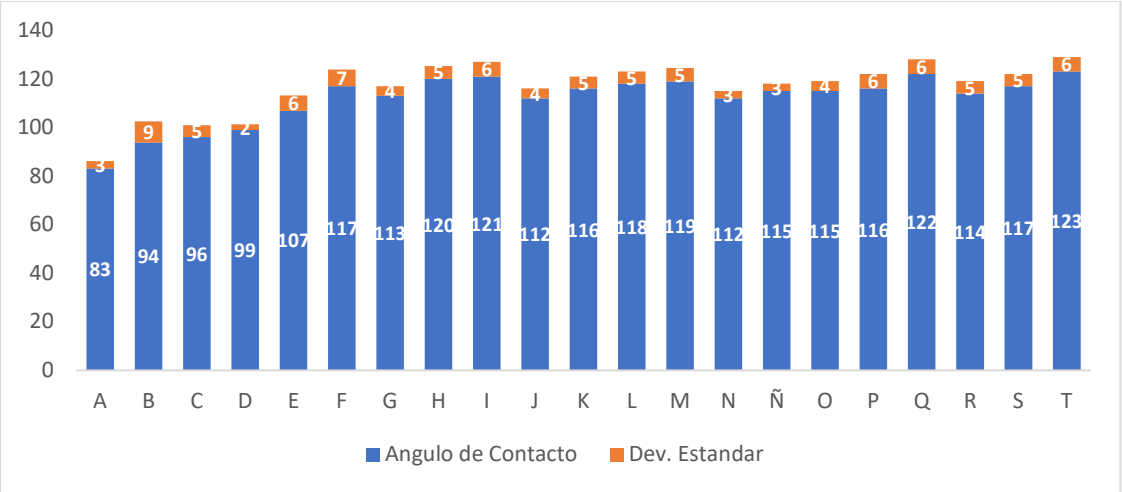



Figura 3.14 Grafica de ángulo de contacto de los bioplástico.

Mirpoor et al., (2023) elaboró bioplásticos a base de proteína de argán con 90-95°, mientras que las películas de cáñamo y cardo tienen ángulo de contacto de 40-65 ° siendo hidrofílico y menciona que una de las principales desventajas de las películas proteicas, es su alta sensibilidad a la humedad. (Mirpoor et al., 2022). Asimismo, Mukaila et al., (2024) encontraron que el ángulo de contacto de las películas se ve afectado por las interacciones PLA/almidón/lecitina, con un ángulo de contacto de entre (59.41 ± 28 º). también Olarte-Paredes et al., (2021) encontraron valores inferiores a los nuestros en sus películas hechas de (PVA/quitosano) reforzadas con rellenos conductores con un ángulo de contacto de (55-69°).

Mientras que la muestra T que contiene las tres celulosas: y el almidón de semilla de aguacate, fue la que obtuvo el mayor ángulo de contacto,123 ° y dando como resultado hidrofóbico, con mejor grado de permeabilidad, siendo esto lo deseable ya que tendrá mejores propiedades de barrera, teniendo un valor cercano a polímeros comerciales como el LDPE con un ángulo de contacto de 112° reportado por (Beitollahpoor et al., 2023).

### 3.3.6 Pruebas mecánicas

En la Tabla 3.11 se muestran los valores obtenidos de resistencia a la tracción, alargamiento, módulo de Young y espesor de las películas.

Tabla 3.11 Análisis de propiedades mecánicas de bioplásticos

| Muestra | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) | Módulo de Young | Espesor |
|---|---|---|---|---|
| | | | MPa | Media (mm) |
| A | 14.85 ± 3.23 | 137.16±8 | 41.342±18.19 | 0.032±0.002 |
| B | 25.76±3.06 | 49.28±4 | 131.334±23.36 | 0.044±0.004 |
| C | 26.49±4.24 | 48.13±4 | 156.550±25.80 | 0.052±0.006 |
| D | 42.8±2.34 | 41.03±3 | 244.104±24.55 | 0.055±0.004 |
| E | 60.12±4.53 | 32.89±2 | 355.259±12.98 | 0.064±0.005 |
| F | 8.25±1.65 | 134.66±7 | 23.475±5.10 | 0.078±0.018 |
| G | 5.84±1.87 | 75.56±8 | 27.91±9.32 | 0.164±0.102 |
| H | 9.24±1.17 | 67.27±6 | 45.215±4.07 | 0.130±0.032 |
| I | 7.33±0.79 | 63.45±5 | 38.468±5.54 | 0.027±0.027 |
| J | 5.36±1.38 | 49.28± 3 | 20.514±4.07 | 0.105±0.023 |
| K | 2.67±0.33 | 244.05±11 | 3.279±1.24 | 0.132±0.023 |
| L | 3.35±1.44 | 162.71±9 | 7.812±4.53 | 0.143±0.021 |
| M | 5.42±2.12 | 56.74±5 | 28.928±0.18 | 0.177±0.089 |
| N | 4.51±0.97 | 390.82±14 | 2.611±1.11 | 0.082±0.008 |
| Ñ | 4.90±0.69 | 295.54±12 | 4.768±1.18 | 0.097±0.008 |
| O | 9.82±1.73 | 101.93±7 | 32.933±12.43 | 0.078±0.013 |
| P | 12.25±3.44 | 127.58±7 | 65.09±21.39 | 0.090±0.024 |
| Q | 3.17±0.73 | 186.79±10 | 5.62±1.89 | 0.093±0.024 |
| R | 11.55±1.89 | 116.81±7 | 38.687±12.69 | 0.090±0.013 |
| S | 10.31±1.07 | 180.59±9 | 24.278±11.58 | 0.070±0.013 |
| T | 4.58±0.55 | 288.60±12 | 4.82±1.38 | 0.098±0.008 |

En comparación con la película A, las películas B-T mostraron un comportamiento mecánico diferente. Las películas con almidón (B, C, D, E) mostraron la menor capacidad de elongación con mayores módulos de Young, lo que demuestra un incremento en la rigidez de la película y en función del contenido de almidón. Por lo tanto, la película E registró mayor rigidez (menor flexibilidad) y alto módulo de Young, debido al mayor contenido de almidón.

Las películas con celulosa de almidón de maíz (G-I) también redujeron su capacidad de elongación con el aumento de la concentración de celulosa. Sin embargo, su rigidez fue menor que las que contienen almidón.
Por el contrario, las películas N y Ñ (con celulosa de zanahoria) fueron más flexibles que la película A, mostrando los menores módulos de Young.
Por su parte las películas combinadas con almidón y celulosa (S y T) también mostraron este comportamiento.

En cuanto al espesor, los valores obtenidos fueron variables. El espesor de la película con almidón aumentó con la concentración de almidón; sin embargo, el espesor de las películas con celulosa dependió de la concentración y su dispersión en la película. Según la norma ASTM D882, las películas presentan un espesor < 1 mm; por lo tanto, este parámetro no influyó en los resultados de las pruebas mecánicas (Szlachetka et al., 2021).

Las Figuras 3.15-3-18 muestran el comportamiento gráfico de los datos obtenidos de las pruebas mecánicas, indicando que las películas de almidón son menos flexibles, mostrando altos módulos de Young, mientras que las películas de mayor flexibilidad y bajos módulos de Young fueron las de celulosa de zanahoria y betabel, y aquellas combinadas con almidón y celulosas.

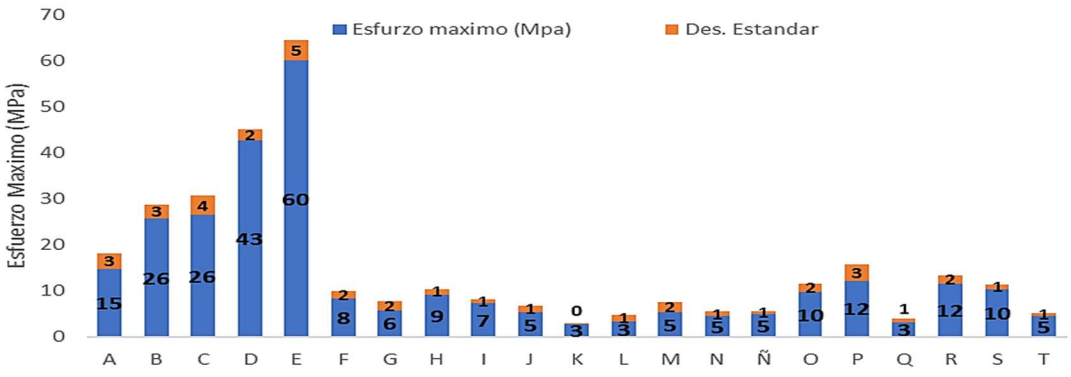



Figura 3.15 Gráfica del esfuerzo de tracción máximo de películas.

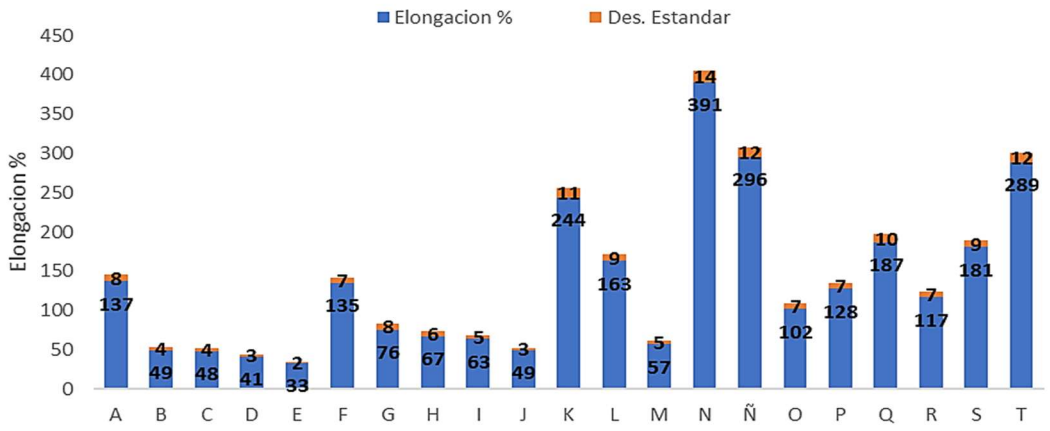



Figura 3.16 Gráfica de la deformación por tracción a la ruptura de películas.

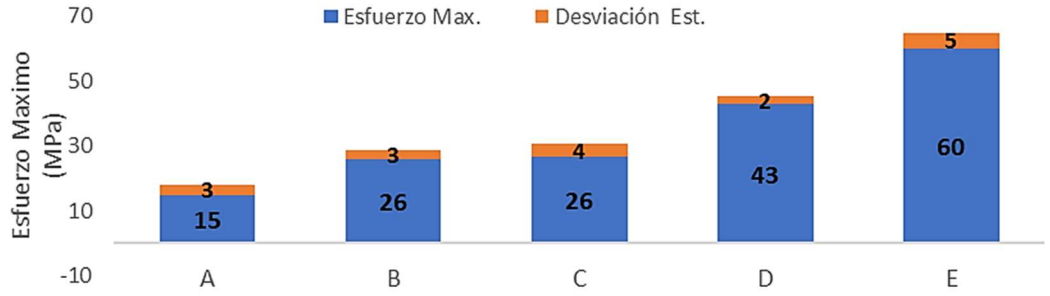



Figura 3.17 Gráfica del esfuerzo de tracción máximo de las películas A, B-E.

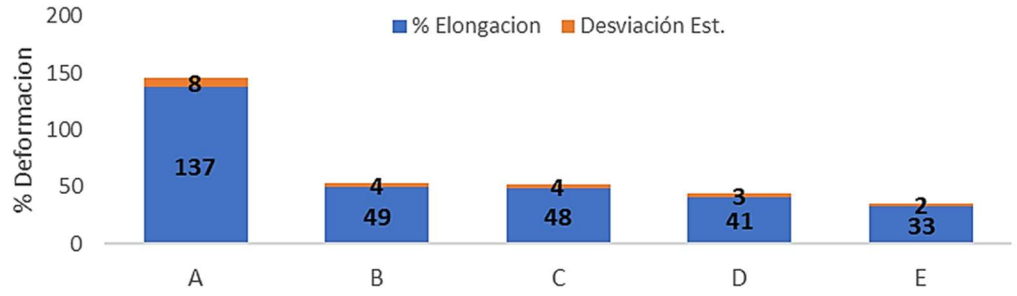



Figura 3.18 Gráfica de deformación por tracción a la ruptura de películas A, A-E.

Adicional a los resultados anteriores, en la tabla 3.12 se presentan los datos obtenidos del análisis ANOVA y la comparación de la respuesta de elongación de las películas A-T mediante la prueba de Tukey con nivel de confianza del 95 % ($p \leq 0.05$), obtenidos mediante el software MINITAB 22.1 (2024). En el análisis comparativo de las películas se muestra el efecto de la presencia y concentración de los componentes (almidón de semilla de aguacate, celulosa de tallo de maíz, betabel, zanahoria, y los films combinados con almidón y celulosa) sobre el porcentaje de la elongación de los films y por consecuencia el módulo de Young.

En el caso de las películas con almidón (B-E), todas las películas presentaron un cambio significativo en el porcentaje de elongación con respecto a la matriz A, reduciendo este valor. Lo cual indicó que todas las películas con almidón incrementaron su rigidez. Sin embargo, el incremento en la concentración del almidón entre las películas (B-E, 0.5-2g) no causó un efectivo significativo en la elongación de la película, lo cual muestra que todas las películas con diferente concentración de almidón presentaron una rigidez similar, resistiendo mejor la deformación elástica.

Las películas con celulosa de tallo de maíz (F-I) también mostraron una reducción importante en el porcentaje de elongación de la matriz A, indicando un cambio significativo en la rigidez de la película por la presencia de celulosa de tallo de maíz. Sin embargo, el efecto de contenido de celulosa sobre la elongación entre las películas se observó significativamente entre la película F y la película I, los demás valores fueron no significativos entre ellos.

En las películas con celulosa de betabel (J-M), el cambio significativo de porcentaje de elongación en la matriz A se observó en la película M, y el efecto entre las películas por el cambio de la concentración de celulosa se observó entre las películas L y M.

Con respecto a las películas con celulosa de zanahoria, la reducción en el porcentaje de elongación fue significativa con respecto a la matriz A, solo en las

películas A-N y A-Ñ. Entre películas, el porcentaje de elongación fue significativamente diferente entre ellos, debido a la concentración de la celulosa.

En las películas compuestos por almidón y celulosa, la diferencia significativa entre películas fue observada entre las películas E-T, donde la película E mostro un valor menor de porcentaje de elongación, debido a la presencia de almidón, mientras que la película T presentó un alto valor de porcentaje de elongación, debido a la presencia de almidón y las celulosas de tallo de maíz betabel y zanahoria.

Tabla 3.12 Resultados del análisis ANOVA y pruebas de comparación de los datos de elongación de las películas A-T mediante la prueba Tukey.

| Tukey | Elongación de almidón de semilla de aguacate | | Tukey | Elongación de celulosa de tallo de maíz | | Tukey | Elongación de celulosa de betabel | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *q* | *37.64642678* | | *q* | *33.70242466* | | *Q* | *74.86633821* | |
| A-B | 89.0292217 | Significativa | F-G | 7.94931 | No significativa | J-K | 149.774053 | Significativa |
| A-C | 87.8848817 | Significativa | F-H | 12.11241333 | No significativa | J-L | 68.43738 | No significativa |
| A-D | 96.1353067 | Significativa | F-I | 61.59784 | Significativa | J-M | 37.5387883 | No significativa |
| A-E | 104.272395 | Significativa | G-H | 4.163103333 | No significativa | K-L | 81.3366733 | Significativa |
| B-C | 1.14434 | No significativa | G-I | 69.54715 | Significativa | K-M | 187.312842 | Significativa |
| B-D | 7.106085 | No significativa | H-I | 73.71025333 | Significativa | L-M | 105.976168 | Significativa |
| B-E | 15.2431733 | No significativa | A-F | 2.497106667 | No significativa | A-J | 42.8845583 | No significativa |
| C-D | 8.250425 | No significativa | A-G | 61.59784 | Significativa | A-K | 106.889495 | Significativa |
| C-E | 16.3875133 | No significativa | A-H | 69.54715 | Significativa | A-L | 25.5528217 | No significativa |
| | | | A-I | 73.71025333 | Significativa | A-M | 80.4233467 | Significativa |

| Tukey | Elongación de celulosa de zanahoria | | Tukey | Elongación de celulosa y almidón | | Tukey | Elongación de 2 g de carga celulosa y almidón | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *q* | *84.01862485* | | *q* | *104.8903494* | | *q* | *62.77914725* | |
| N-Ñ | 95.2857633 | Significativa | Q-R | 77.4902 | No significativa | E-I | 30.56214 | No significativa |
| N-O | 288.899262 | Significativa | Q-S | 17.2349 | No significativa | E-M | 23.84905 | No significativa |
| N-P | 322.536723 | Significativa | Q-T | 110.116 | Significativa | E-P | 35.39969 | No significativa |
| Ñ-O | 193.613498 | Significativa | Q-A | 54.1975 | No significativa | E-T | 255.7129 | Significativa |
| Ñ-P | 227.25096 | Significativa | R-S | 60.2553 | No significativa | I-M | 6.713093 | No significativa |
| O-P | 33.6374617 | No significativa | R-T | 187.606 | Significativa | I-P | 4.837545 | No significativa |
| A-N | 253.664015 | Significativa | R-A | 23.2927 | No significativa | I-T | 225.1507 | Significativa |
| A-Ñ | 158.378252 | Significativa | S-T | 127.351 | Significativa | M-P | 11.55064 | No significativa |
| A-O | 35.2352467 | No significativa | S-A | 36.9626 | No significativa | M-T | 231.8638 | Significativa |
| A-P | 68.8727083 | No significativa | A-T | 164.314 | Significativa | P-T | 220.3132 | Significativa |

Domene-López et al., (2019), describieron el mismo efecto reportado en un trabajo previo por el cual estudió el almidón extraído de papa, maíz, trigo y arroz.

Según Dewi et al., (2023). La adición de carga de celulosa puede aumentar el valor de resistencia a la tracción porque el alto contenido de fibra, la cual puede llenar el espacio en la matriz.

Kapila et al., (2023) reportaron una elongación del 268.64 % en sus películas nanocompuestas de alcohol polivinílico (PVA) y óxido de grafeno. Por su parte, Harunsyah et al., (2017) obtuvieron una elongación del 236.80 % en bioplásticos elaborados a partir de almidón de yuca reforzado con óxido de zinc, mientras que Yahia et al. (2022) informaron un valor de 148 % en películas formuladas con almidón, PVA, sorbitol y aceite de cardán. Asimismo, Lubis et al., (2016) desarrollaron bioplásticos a base de almidón de semilla de aguacate, reforzados con celulosa de palma aceitera y glicerol, logrando una elongación a la rotura del 13.36 %. En comparación, las películas obtenidas en este estudio N (390 %), Ñ (295 %) y T (288 %) presentaron valores de elongación notablemente superiores, lo que evidencia una mejora significativa en la elongación del material.

En cuanto al esfuerzo máximo, Gomes de Menezes et al., (2021) obtuvieron valores entre 39 y 50 MPa en bioplásticos compuestos de quitosano y almidón de yuca. De igual manera, diversos autores han explorado formulaciones con almidón de yuca, como Ninan et al., (2024), quien reportó una resistencia de 4.2 MPa, y Ancy et al., (2024), con 4.3 MPa. Lubis et al., (2016), en su trabajo con almidón de semilla de aguacate reforzado, lograron una resistencia máxima a la tracción de 2.74 MPa. En contraste, la película E desarrollada en este estudio alcanzó un esfuerzo máximo de 60 MPa, superando ampliamente los valores reportados en la literatura consultada.

### 3.3.7 Permeabilidad

La Tabla 3.13 muestra datos de las películas que indican la permeabilidad al agua (%) y el índice de hinchamiento (%). En general, las películas B-T fueron menos permeables que la película A, que presentó una alta absorción de agua, con una permeabilidad del 50% y un índice de hinchamiento del 82%, debido a la presencia de gelatina. Las películas B-T mostraron rangos de permeabilidad del 19% al 33% y un índice de hinchamiento del 40% al 65%.

El menor porcentaje de permeabilidad y porcentaje de hinchamiento se observó en las películas T<I<H<Q<G, que corresponden a películas que contienen almidón de celulosa y celulosa de tallo de maíz (T, Q) y celulosa de tallo de maíz (I, H, G). Esto indica que la menor capacidad de absorción (19-24%) se debió a la presencia de celulosa de tallo de maíz.

Por el contrario, las películas con almidón (B-E) y celulosa de residuos de zanahoria (N-P) mostraron una mayor capacidad de absorción (27-33%), mientras que otras películas mostraron una permeabilidad promedio de 24-28% y un hinchamiento de 42-62%.

Estos últimos resultados dependieron del contenido de componentes y de las interacciones del almidón y la celulosa de tallo de maíz, lo que redujo la capacidad de absorción de agua de la película T.

Tabla 3.13 Porcentajes de solubilidad e hinchamiento.

| Películas | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | Ñ | O | P | Q | R | S | T |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Solubilidad (%) | 50 | 33 | 33 | 28 | 28 | 25 | 24 | 22 | 20 | 31 | 30 | 30 | 28 | 30 | 30 | 28 | 27 | 23 | 25 | 25 | 19 |
| Desv. Est. | 0.44 | 0.25 | 0.24 | 0.22 | 0.21 | 0.19 | 0.21 | 0.11 | 0.11 | 0.23 | 0.22 | 0.24 | 0.15 | 0.17 | 0.11 | 0.09 | 0.11 | 0.19 | 0.14 | 0.16 | 0.15 |
| Hinchamiento (%) | 82 | 65 | 65 | 58 | 58 | 55 | 48 | 45 | 43 | 60 | 57 | 55 | 50 | 55 | 55 | 52 | 52 | 46 | 48 | 48 | 40 |
| Desv. Est. | 0.61 | 0.56 | 0.53 | 0.51 | 0.50 | 0.53 | 0.48 | 0.48 | 0.43 | 0.51 | 0.47 | 0.43 | 0.46 | 0.49 | 0.48 | 0.38 | 0.39 | 0.46 | 0.47 | .044 | 0.46 |

Otras películas reportadas mostraron datos diferentes. Mirpoor et al., (2023) elaboraron bioplásticos a partir de extractos proteicos de subproductos de aceite de semilla, mostrando un hinchamiento de 41-53%, mientras que Ranote et al., (2024)

reportaron rangos de solubilidad máxima del 55,63 % y mínima del 25,67 % para películas de goma de Moringa oleifera/alcohol polivinílico, que dependían de la concentración de los componentes.

Mroczkowska et al., (2024) mostraron un hinchamiento de entre el 48 % y el 58 % para sus bioplásticos recubiertos con cutina. La solubilidad en agua alcanzó el 60 % después de 24 h. Las películas de Pérez-Marroquín et al., (2022), basadas en almidón y gelatina, presentaron una solubilidad de aproximadamente el 30 %.

### 3.3.8 Pruebas de degradabilidad de las películas

La Tabla 3.14 muestra el porcentaje de degradación cinética por degradación biológica y fisicoquímica de las películas E-T, incluyendo los factores biológicos (B), agua y sol (A/S), agua y aire (A/A) y sol y aire (S/A).

a) Degradación fisicoquímica (Sol y aire). La degradación fisicoquímica por rayos UV se muestra en la Tabla 3.13. La muestra A fue la más degradable. Seguido de la muestra M.

b) Degradación por (agua y aire). La muestra A se degradó completamente, perdiendo masa a los 20 Por otro lado, las películas E, P y T fueron muy degradables, alcanzando el 100% de degradación en 30 días, como se muestra en la Tabla 3.13.

c) Degradación por (agua y sol). Las pruebas de degradación agua y sol (A/S) se muestran en la Tabla 3.13 La película A se degradó completamente en los primeros 20 días, seguido por las películas E, P y T las cuales fueron muy degradables, alcanzando el 100% de degradación en 30 días, y el resto de las películas se degradaron en 40 días.

d) Degradación biológica. Los valores de biodegradabilidad de las diferentes muestras se muestran en la Tabla 3.13. A un pH de 7 y una temperatura de 24,6 °C, La muestra A se degradó al 100 %, en los primeros 10 días Figura 3.22. mientras

que la muestra E y P se degradaron completamente a los 20 días con contenido de almidón y celulosas. Sin embargo, transcurridos 30 días, se degradaron todas las películas.

Por lo tanto, según la degradabilidad de las películas, son altamente degradables y respetuosas con el medio ambiente.

Tabla 3.14 Degradación fisicoquímicas y bilógica de las películas.

| **Días** | **10** | | | | **20** | | | | **30** | | | | **40** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Película/Degradación | **B** | **A/S** | **A/A** | **S/A** | **B** | **A/S** | **A/A** | **S/A** | **B** | **A/S** | **A/A** | **S/A** | **B** | **A/S** | **A/A** | **S/A** |
| A | 100 | 50 | 70 | 30 | 100 | 100 | 100 | 50 | 100 | 100 | 100 | 60 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| E | 80 | 35 | 30 | 20 | 100 | 50 | 60 | 50 | 100 | 70 | 80 | 70 | 100 | 100 | 100 | 90 |
| I | 60 | 25 | 20 | 10 | 80 | 50 | 30 | 35 | 100 | 80 | 70 | 60 | 100 | 100 | 100 | 83 |
| M | 70 | 50 | 60 | 50 | 90 | 70 | 80 | 70 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| P | 80 | 60 | 70 | 20 | 100 | 90 | 90 | 40 | 100 | 100 | 100 | 70 | 100 | 100 | 100 | 90 |
| T | 65 | 50 | 60 | 20 | 80 | 80 | 80 | 35 | 100 | 100 | 100 | 55 | 100 | 100 | 100 | 85 |

Estudios previos han reportado la degradabilidad de diferentes materiales bioplásticos como Mohamed et al., (2023) obtuvo un resultado similar con sus películas compuestas de alginato, que se degradaron en 14 días. Ibrahim et al., (2019) indicaron que la degradabilidad de las películas de almidón de maíz y fibra de hoja de maíz fue de 14 días. atribuyéndolo a la estrecha relación entre la humedad existente y la actividad microbiana del suelo. Jayalath et al., (2025) encontraron que los compuestos de gelatina y almidón de yuca se degradaron en un 67,00 % en 7 días, mientras que el almidón de maíz y arroz se degradó en un 51,81 %, mientras que el compuesto de maíz fue del 47,72 % después de 14 días. Los valores de biodegradabilidad de la película indican que es apta para aplicaciones de embalaje y se puede desechar fácilmente, lo que demuestra su respeto al medio ambiente.

## 3.4 Pruebas de aplicación de las películas en forma de bolsa

La Figura 3.22 muestra la pérdida de peso del queso manchego almacenado en las películas A-T utilizadas como envoltura, incluyendo PE (control de envoltura) y V (control sin envoltura), durante 21 días de almacenamiento a 4 °C.

Como se esperaba, después de 6 días de almacenamiento, la muestra de queso sin envoltura (V) mostró la mayor deshidratación, presentando la mayor pérdida de peso (30-35%). Por el contrario, la película PE (control) mantuvo la frescura y la calidad del queso con la menor pérdida de peso (4%), presentando alta impermeabilidad y resistencia a la humedad, lo que impidió que el queso perdiera peso y se secara.

Por otro lado, las películas elaboradas T, Q, I y H, que contienen almidón y celulosa de tallo de maíz, y solo celulosa de tallo de maíz, exhibieron la mejor protección del alimento, mostrando rangos de pérdida de peso del queso del 8-15 %. Las demás películas que contienen almidón y celulosa de remolacha y zanahoria, incluida la película A, mostraron valores de permeabilidad del 15-18%, lo que confirma que estas películas presentan una mayor permeabilidad que las películas que contienen celulosa de tallo de maíz, como se indicó en la sección 3.3.7.

Otra información mostró que, tras 21 días de almacenamiento del queso, las muestras con películas B-T presentaron un amarilleamiento inicial en los bordes. Además, las películas B-T no mostraron cambios en el material; sin embargo, la película A mostró degradación del material debido a la humedad del área de almacenamiento.

Según los resultados, las películas que contienen celulosa de tallo de maíz (T, Q, I, H) podrían utilizarse como envoltorio para queso manchego; sin embargo, se necesitan más estudios para mejorar la formulación de las películas y evaluar otras propiedades del queso. (Véase en Figura 3.24.)

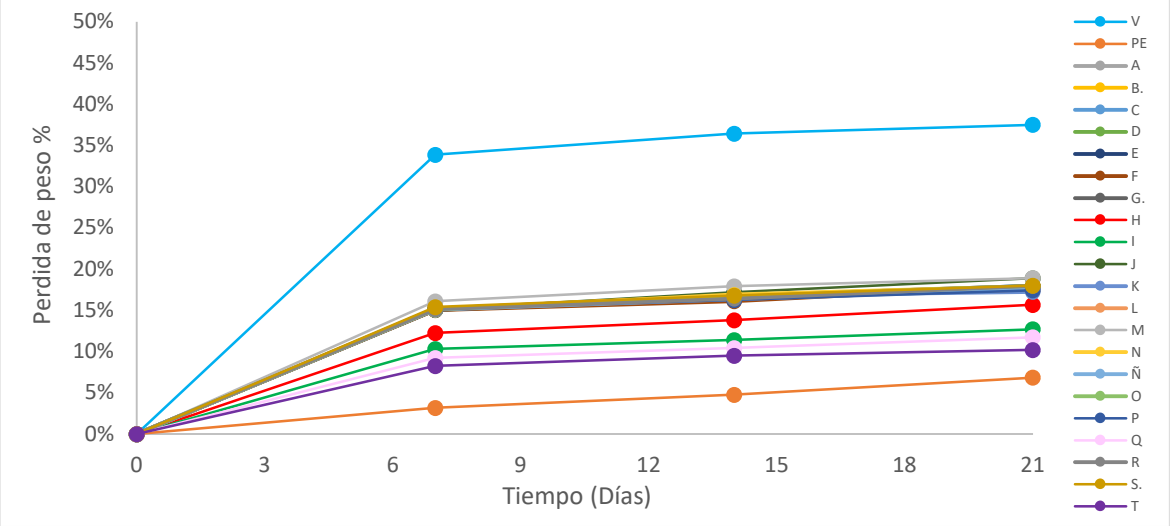



Figura 3.19 Porcentaje de pérdida de peso del queso después de 7, 14 y 21 días cuando se envasa con películas bioplásticas hechas de almidón y celulosa.

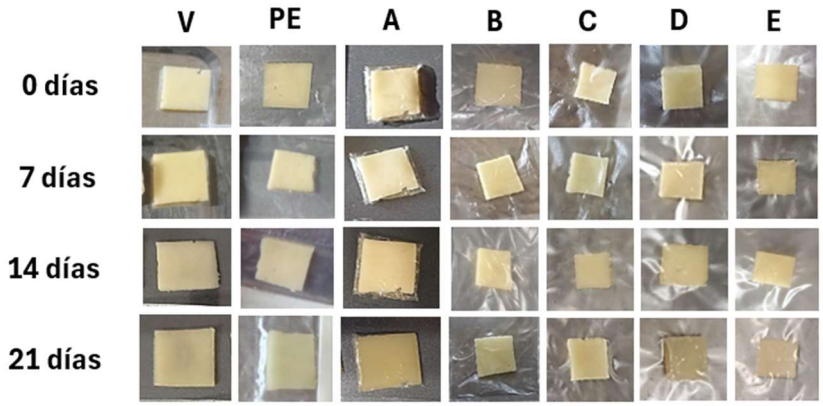



Figura 3.20 Bolsas de películas termosellables de quesos a los 0, 7, 14 y 21 días.

Jridi et al., (2020) evaluaron el comportamiento de una biopelícula a base de gelatina sobre queso como envoltorio, observando un comportamiento similar al de la película A. Los autores indicaron que la película de gelatina permitió la circulación del aire en la muestra, mostrando amarilleamiento. Asimismo, Lopes et al., (2024) descubrieron que el queso envasado con una película a base de almidón de algarroba y patata lo protegía parcialmente, observando la deshidratación de la muestra. Los autores asociaron este resultado con las propiedades de barrera de las películas bioplásticas.

# CONCLUSIONES

Las películas se elaboraron utilizando la matriz agua-glicerol-gelatina, y con la incorporación de diferentes formulaciones de almidón de semilla de aguacate, celulosas de residuos de tallo de maíz, remolacha y zanahoria, así como una combinación de almidón-celulosa mostraron las siguientes características.

Las películas con almidón (B, C, D, E) presentaron menor capacidad de elongación que las películas con celulosa y aquellas con almidón-celulosa. Las películas más deformables fueron las que contenían celulosa de zanahoria y remolacha (J, K, L, M, N, Ñ, O, P), presentando niveles bajos de módulo de Young.

Las películas que contenían celulosas y almidón (T, Q) y solo tallo de maíz (I, H) exhibieron la mayor hidrofobicidad, alcanzando rangos de ángulos de contacto de hasta 123° y una baja permeabilidad de hasta el 19%. El análisis térmico TGA indicó que las películas con celulosa de tallo de maíz (I, H) y remolacha (L, M) presentaron una resistencia superior a la degradación térmica. A su vez, el análisis DSC reveló que las mayores temperaturas de GTT/°C, CTC/°C y MT/°C se encontraron en la película con mayor carga de almidón (E), mientras que las películas con celulosa de zanahoria y almidón-celulosas (Q, R, S, T) mostraron las temperaturas de DSC más bajas. En la película para envoltura de queso, las muestras con queso manchego mostraron una pérdida de peso del 8-10% (90,92% de conservación). Específicamente, las películas con almidón-celulosas mostraron una pérdida de peso del 8%, mientras que las películas con celulosa de tallo de maíz mostraron una pérdida de peso del 10%. El análisis de degradabilidad mostró que todas las películas se degradaron en composta en menos de 20 días, perdiendo completamente su masa. De acuerdo con los resultados de pruebas de factores fisicoquímicos, todas las películas se degradaron antes de 40 días, lo cual es esencial en términos de impacto ambiental. En resumen, la diferencia entre las propiedades de las películas demostró que podrían utilizarse en diferentes aplicaciones para la industria alimentaria; sin embargo, en las películas para queso manchego, las películas elaboradas conservaron la humedad del queso durante su almacenamiento, lo cual podría utilizarse para futuras investigaciones.

## FUENTES CONSULTADAS


Ajayi, V. A., & Lateef, A. (2023). Biotechnological valorization of agrowastes for circular bioeconomy: Melon seed shell, groundnut shell and groundnut peel. Cleaner and Circular Bioeconomy, 4(100039), 100039. https://doi.org/10.1016/j.clcb.2023.100039.

Amin, M. R., Chowdhury, M. A., & Kowser, M. A. (2019). Characterization and performance analysis of composite bioplastics synthesized using titanium dioxide nanoparticles with corn starch. Heliyon, 5(8), e02009. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02009.

Ancy, A., Lazar, M., Saritha Chandran, A., & Ushamani, M. (2024). Development of ecofriendly and sustainable bioplastics from cassava starch: Tailoring the properties using nanoparticles. Sustainable Chemistry and Pharmacy, *37*, Article 101377. https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101377

Araújo, R. G., Rodríguez-Jasso, R. M., Ruiz, H. A., Govea-Salas, M., Rosas-Flores, W., Aguilar-González, M. A., Pintado, M. E., Lopez-Badillo, C., Luevanos, C., & Aguilar, C. N. (2020). Hydrothermal–microwave processing for starch extraction from Mexican avocado seeds: Operational conditions and characterization. Processes (Basel, Switzerland), 8(7), 759. https://doi.org/10.3390/pr8070759.

Archundia Velarde, E. D., Mariezcurrena Berasain, M. D., Morales Luckie, R. A., Medina Medina, D. I., Lackner, M., Garduño, G. V., & Mohamed Salem, A. Z. (2025). Development and characterization of active gelatin-chitosan packaging incorporated with guava leaf extract for extending meat shelf life. Journal of Agriculture and Food Research, 19(101555), 101555. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101555.

Asikkutlu, A. G., & Yildirim-Yalcin, M. (2025). Optimization of mechanical and water barrier properties of avocado seed starch based film and its application as smart pH indicator by adding blue butterfly pea flower extract. Food Chemistry: X, 25(102155), 102155. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102155.

Azmin, S. N. H. M., Hayat, N. A. B. M., & Nor, M. S. M. (2020). Development and characterization of food packaging bioplastic film from cocoa pod husk cellulose

incorporated with sugarcane bagasse fibre. Journal of Bioresources and Bioproducts, 5(4), 248–255. https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.10.003.

Bangar, S. P., Whiteside, W. S., Ashogbon, A. O., & Kumar, M. (2021). Recent advances in thermoplastic starches for food packaging: A review. Food Packaging and Shelf Life, 30(100743), 100743. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100743.

Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 364(1526), 1985–1998. https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205.

Beitollahpoor, M., Hasanzadeh, R., Hedayati, A., & Moradi, A. R. (2023). Force-based characterization of the wetting properties of LDPE and textured LDPE films treated with low-pressure plasma. Polymers, 15(9), 2132. https://doi.org/10.3390/polym15092132

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.2006.07.016.

Bourbia, S., Kazeoui, H., & Belarbi, R. (2023). A review on recent research on bio-based building materials and their applications. Materials for Renewable and Sustainable Energy, 12, 117–139. https://doi.org/10.1007/s40243-023-00234-7

Chavan, R. B., Rathi, S., Jyothi, V. G. S. S., & Shastri, N. R. (2019). Cellulose based polymers in development of amorphous solid dispersions. Asian Journal of Pharmaceutical Sciences, 14(3), 248–264. https://doi.org/10.1016/j.ajps.2018.09.003.

Charoensopa, K., Thangunpai, K., Kong, P., Enomae, T., & Ploysri, W. (2024). Extraction of Nanocellulose from the Residue of Sugarcane Bagasse Fiber for Anti-Staphylococcus aureus (S. aureus) Application. *Polymers*, *16*(11), 1612. https://doi.org/10.3390/polym16111612

Chong, T. Y., Law, M. C., & Chan, Y. S. (2021). The potentials of corn waste lignocellulosic fibre as an improved reinforced bioplastic composites. Journal of Polymers and the Environment, 29(2), 363–381. https://doi.org/10.1007/s10924-020-01888-4.

Choudhary, S., Sharma, K., Mishra, P. K., Kumar, V., & Sharma, V. (2023). Development and characterization of biodegradable agarose/gum neem/nanohydroxyapatite/polyoxyethylene sorbitan monooleate based edible bio-film for applications towards a circular economy. Environmental Technology & Innovation, 29(103023), 103023. https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103023.

Chowdhury, M. A., Badrudduza, M. D., Hossain, N., & Rana, M. M. (2022). Development and characterization of natural sourced bioplastic synthesized from tamarind seeds, berry seeds and licorice root. Applied Surface Science Advances, 11(100313), 100313. https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100313.

De Dios-Avila, N., Tirado-Gallegos, J. M., Estrada-Virgen, M. O., Rios-Velasco, C., Luna-Esquivel, G., Zamudio-Flores, P. B., Isiordia-Aquino, N., & Cambero Campos, O. J. (2022). Caracterización estructural y fisicoquímica de almidones de semilla de aguacate modificados mediante hidrólisis ácida a alta temperatura. Revista bio ciencias, 9. https://doi.org/10.15741/revbio.09.e1272.

de Ruijter, V. N., Milou, A., & Costa, V. (2019). Assessment of microplastics distribution and stratification in the shallow marine sediments of Samos island, Eastern Mediterranean sea, Greece. Mediterranean marine science, 20(4), 736. https://doi.org/10.12681/mms.19131.

Dewi, A. P., Mardhiyana, A., Manfaati, R., & Leoanggraini, U. (2023). The effect of additional chitosan and cellulose on the performance of bioplastic from Manihot Glaziovii starch. Fluida, 16(1), 36–42. https://doi.org/10.35313/fluida.v16i1.4394.

Domene-López, D., García-Quesada, J. C., Martin-Gullon, I., & Montalbán, M. G. (2019). Influence of starch composition and molecular weight on physicochemical properties of biodegradable films. Polymers, 11(7), 1084. https://doi.org/10.3390/polym11071084.

Dorigato, A., & Fredi, G. (2024). Effect of nanofillers addition on the compatibilization of polymer blends. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 7(4), 405–427. https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.09.004.

Elegbede, J. A., Ajayi, V. A., & Lateef, A. (2021). Microbial valorization of corncob: Novel route for biotechnological products for sustainable bioeconomy. Environmental Technology & Innovation, 24(102073), 102073. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102073.

Eriksen, M., Cowger, W., Erdle, L. M., Coffin, S., Villarrubia-Gómez, P., Moore, C. J., Carpenter, E. J., Day, R. H., Thiel, M., & Wilcox, C. (2023). A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans-Urgent solutions required. *PloS One*, *18*(3), e0281596. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596

Feijoo, P., Marín, A., Samaniego-Aguilar, K., Sánchez-Safont, E., Lagarón, J. M., Gámez-Pérez, J., & Cabedo, L. (2023). Effect of the presence of lignin from woodflour on the compostability of PHA-based biocomposites: Disintegration, biodegradation and microbial dynamics. Polymers, 15(11), 2481. https://doi.org/10.3390/polym15112481.

Filiciotto, L., & Rothenberg, G. (2021). Biodegradable plastics: Standards, policies, and impacts. ChemSusChem, 14(1), 56–72. https://doi.org/10.1002/cssc.202002044.

Flórez Montes, C., & Rojas González, A. F. (2019). Aprovechamiento potencial de residuos de la agroindustria caldense según su composición estructural. Revista Facultad de Ciencias Básicas, 14(2), 143–151. https://doi.org/10.18359/rfcb.3411

Gazette.gc.ca. Canadian Goverment 2021 https://gazette.gc.ca/rp-pr/p1/2021/2021-12-25/html/reg2-eng.htm

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, 3(7), e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782.

Gomes de Menezes, F. L., de Lima Leite, R. H., Gomes dos Santos, F. K., Aria, A. I., & Aroucha, E. M. M. (2021). TiO2-enhanced chitosan/cassava starch biofilms for

sustainable food packaging. Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects, 630(127661), 127661. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127661.

Guzman-Puyol, S., Hierrezuelo, J., Benítez, J. J., Tedeschi, G., Porras-Vázquez, J. M., Heredia, A., Athanassiou, A., Romero, D., & Heredia-Guerrero, J. A. (2022). Transparent, UV-blocking, and high barrier cellulose-based bioplastics with naringin as active food packaging materials. International Journal of Biological Macromolecules, 209(Pt B), 1985–1994. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.177.

Harunsyah, M., Yunus, M., & Fauzan, R. (2017). Mechanical properties of bioplastics cassava starch film with zinc oxide nanofiller as reinforcement. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 210(1), 012015. https://doi.org/10.1088/1757-899X/210/1/012015

Hendrawati, Liandi, A. R., Ahyar, H., Maladi, I., Azhari, A., & Cornelia, M. (2023). The influence of the filler addition of rice husk cellulose, polyvinyl alcohol, and zinc oxide on the characteristics of environmentally friendly cassava biodegradable plastic. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 8(100520), 100520. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100520.

Heredia-Guerrero, J. A., Benítez, J. J., Porras-Vázquez, J. M., Tedeschi, G., Morales, Y., Fernández-Ortuño, D., Athanassiou, A., & Guzman-Puyol, S. (2023). Plasticized, greaseproof chitin bioplastics with high transparency and biodegradability. Food Hydrocolloids, 145(109072), 109072. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109072

Ibrahim, M. I. J., Sapuan, S. M., Zainudin, E. S., & Zuhri, M. Y. M. (2019). Potential of using multiscale corn husk fiber as reinforcing filler in cornstarch-based biocomposites. International Journal of Biological Macromolecules, 139, 596–604. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.015.

Ibrahim, N. I., Shahar, F. S., Sultan, M. T. H., Shah, A. U. M., Safri, S. N. A., & Mat Yazik, M. H. (2021). Overview of bioplastic introduction and its applications in product packaging. Coatings, 11(11), 1423. https://doi.org/10.3390/coatings11111423.

Jayalath, U. T., Samaraweera, H., & Samarasinghe, A. (2025). Development and characterization of gelatin-starch bioplastics: A comparative study of cassava, corn, and rice-based alternatives. Sustainable Chemistry for the Environment, 9(100190), 100190. https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100190.

Jridi, M., Abdelhedi, O., Salem, A., Kechaou, H., Nasri, M., & Menchari, Y. (2020). Physicochemical, antioxidant and antibacterial properties of fish gelatin-based edible films enriched with orange peel pectin: Wrapping application. Food Hydrocolloids, 103(105688), 105688. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105688.

Kapila, K., Kirtania, S., Devi, L. M., Saikumar, A., Badwaik, L. S., & Rather, M. A. (2023). Potential perspectives on the use of poly (vinyl alcohol)/graphene oxide nanocomposite films and its characterization. Journal of Food Measurement & Characterization. 18, 1012–1025 (2024) https://doi.org/10.1007/s11694-023-02264-1.

Kapila, K., Kirtania, S., Devi, L.M. et al. Potential perspectives on the use of poly (vinyl alcohol)/graphene oxide nanocomposite films and its characterization. Food Measure 18, 1012–1025 (2024). https://doi.org/10.1007/s11694-023-02264-1

Karan, H., Funk, C., Grabert, M., Oey, M., & Hankamer, B. (2019). Green bioplastics as part of a circular bioeconomy. Trends in Plant Science, 24(3), 237–249. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.010.

Kaur, G., Uisan, K., Ong, K. L., & Ki Lin, C. S. (2018). Recent Trends in Green and Sustainable Chemistry & Waste Valorisation: Rethinking Plastics in a circular economy. Current opinion in green and sustainable chemistry, 9, 30–39. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2017.11.003

Kee, S. H., Chiongson, J. B. V., Saludes, J. P., Vigneswari, S., Ramakrishna, S., & Bhubalan, K. (2021). Bioconversion of agro-industry sourced biowaste into biomaterials via microbial factories - A viable domain of circular economy. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, *271*(116311), 116311. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116311

Kowser, M. A., Mahmud, H., Chowdhury, M. A., Hossain, N., Mim, J. J., & Islam, S. (2025). Fabrication and characterization of corn starch based bioplastic for packaging applications. Results in Materials, 25(100662), 100662. https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100662.

Latorre, M. E., de Escalada Plá, M. F., Rojas, A. M., & Gerschenson, L. N. (2013). Blanching of red beet (Beta vulgaris L. var. conditiva) root. Effect of hot water or microwave radiation on cell wall characteristics. Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology], 50(1), 193–203. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.06.004.

Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. Environment International, 163(107199), 107199. https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199

Li, H., Zhou, M., Mohammed, A. E. A. Y., Chen, L., & Zhou, C. (2022). From fruit and vegetable waste to degradable bioplastic films and advanced materials: A review. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 30(100859), 100859. https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100859.

Liu, W., Wang, Z., Liu, J., Dai, B., Hu, S., Hong, R., Xie, H., Li, Z., Chen, Y., & Zeng, G. (2020). Preparation, reinforcement and properties of thermoplastic starch film by film blowing. Food Hydrocolloids, 108(106006), 106006. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106006.

Liu, Ying, Yang, L., Ma, C., & Zhang, Y. (2019). Thermal behavior of sweet potato starch by non-isothermal thermogravimetric analysis. Materials, 12(5), 699. https://doi.org/10.3390/ma12050699.

Liu, Yucheng, Lv, X., Bao, J., Xie, J., Tang, X., Che, J., Ma, Y., & Tong, J. (2019). Characterization of silane treated and untreated natural cellulosic fibre from corn stalk waste as potential reinforcement in polymer composites. Carbohydrate Polymers, 218, 179–187. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.088.

Lopes, J., Pettersen, M. K., Grøvlen, M. S., Sharmin, N., Li, K. D., Wetterhus, E., Ferreira, P., Coimbra, M. A., & Gonçalves, I. (2024). Heat-sealable bioplastic films of blended locust bean and potato byproducts for active packaging of fatty foods: Cheese and oat cookies as case studies. Food Hydrocolloids, 147(109322), 109322. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109322.

López-Velázquez, L. Y., Salgado-García, S., Turrado-Saucedo, J., Hidalgo-Moreno, C. I., Ortiz-García, C. F., Córdova-Sánchez, S., Saucedo-Corona, A. R., & Canché-Escamilla, G. (2020). Celulosa y microcelulosa de residuos del cultivo de caña de azúcar (Saccharum spp.). *Agroproductividad*, 13(4). https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1591 .

Lubis, M., Harahap, M. B., Ginting, M., Sartika, M., & Azmi, H. (2016). Effect of microcrystalline cellulose (MCC ) from sugar palm fibres and glycerol addition on mechanical properties of bioplastic from avocado seed starch (Persea Americana mill) Journal of Engineering Science and Technology, 13(2), 381–393..https://www.semanticscholar.org/paper/144a63c219e820f7e3b2f67ceb95ab3dc3864a24

Manger, C., & Ishimwe, S. (s/f). *European bioplastics e.V*. https://docs.european-bioplastics.org/PR/2022/EUBP_PR_Market_Data_2022_221206_ENG.pdf.

Malki, M. K. S., Wijesinghe, J. A. A. C., Ratnayake, R. H. M. K., & Thilakarathna, G. C. (2023). Characterization of arrowroot (Maranta arundinacea) starch as a potential starch source for the food industry. Heliyon, 9(9), e20033. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20033

Marichelvam, M. K., Manimaran, P., Sanjay, M. R., Siengchin, S., Geetha, M., Kandakodeeswaran, K., Boonyasopon, P., & Gorbatyuk, S. (2022). Extraction and development of starch-based bioplastics from Prosopis Juliflora Plant: Eco-friendly and sustainability aspects. Current Research in Green and Sustainable Chemistry, 5(100296), 100296. https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100296

Martins, S. H. F., Pontes, K. V., Fialho, R. L., & Fakhouri, F. M. (2022). Extraction and characterization of the starch present in the avocado seed (Persea americana mill)

for future applications. Journal of Agriculture and Food Research, 8(100303), 100303. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100303

Matsakas, L., Gao, Q., Jansson, S., Rova, U., & Christakopoulos, P. (2017). Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals. Electronic Journal of Biotechnology: EJB, 26, 69–83. https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2017.01.004

Md Salim, R., Asik, J., & Sarjadi, M. S. (2021). Chemical functional groups of extractives, cellulose and lignin extracted from native Leucaena leucocephala bark. Wood Science and Technology, 55(2), 295–313. https://doi.org/10.1007/s00226-020-01258-2

Mendoza Quiroga, R., & Velilla Díaz, W. (2011). Metodología para la caracterización termo-mecánica de películas plásticas biodegradables. Prospectiva. http://repositorio.uac.edu.co/handle/11619/1295

Mirpoor, S. F., Ibáñez-Ibáñez, P. F., Giosafatto, C. V. L., del Castillo-Santaella, T., Rodríguez-Valverde, M. A., & Maldonado-Valderrama, J. (2023). Surface activity of protein extracts from seed oil by-products and wettability of developed bioplastics. Food Hydrocolloids, 145(109091), 109091. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109091

Mirpoor, S. F., Varriale, S., Porta, R., Naviglio, D., Spennato, M., Gardossi, L., Giosafatto, C. V. L., & Pezzella, C. (2022). A biorefinery approach for the conversion of Cynara cardunculus biomass to active films. Food Hydrocolloids, 122(107099), 107099. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107099

Mohammed, A., Gaduan, A., Chaitram, P., Pooran, A., Lee, K.-Y., & Ward, K. (2023). Sargassum inspired, optimized calcium alginate bioplastic composites for food packaging. Food Hydrocolloids, 135(108192), 108192. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108192

Morán, J. I., Alvarez, V. A., Cyras, V. P., & Vázquez, A. (2008). Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers. Cellulose (London, England), 15(1), 149–159. https://doi.org/10.1007/s10570-007-9145-9

Mroczkowska, M., Culliton, D., Germaine, K. J., Hegde, M., Tobin, E. F., & Neves, A. C. (2024). Valorisation of tomato waste as a source of cutin for hydrophobic surface coatings to protect starch- and gelatine-blend bioplastics. Biomass (Basel, Switzerland), 4(3), 990–1004. https://doi.org/10.3390/biomass4030055

Mukaila, T., Adeniyi, A., Bello, I., Sarker, N. C., Monono, E., & Hammed, A. (2024). Optimizing film mechanical and water contact angle properties via PLA/starch/lecithin concentrations. Cleaner and Circular Bioeconomy, 8(100095), 100095. https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100095

Muyonga, J. H., Cole, C. G. B., & Duodu, K. G. (2004). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopic study of acid soluble collagen and gelatin from skins and bones of young and adult Nile perch (Lates niloticus). Food Chemistry, 86(3), 325–332. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.09.038

Nicholson, J. W. (2006). Polymer chemistry. En *Chemistry of Polymers* (pp. 1–22). The Royal Society of Chemistry

Nigam, S., Das, A. K., & Patidar, M. K. (2021). Valorization of Parthenium hysterophorus weed for cellulose extraction and its application for bioplastic preparation. Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(4), 105424. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105424

Ninan, N., Pidhatika, B., Bright, R., Kartika, B. M., Rudianto, R. P., Swasono, Y. A., Ardhani, R., & Vasilev, K. (2024). Advancing sustainable technologies: plasma-engineered bioplastics with silver nanoparticle integration. Journal of Materials Science, 59(20), 9003–9020. https://doi.org/10.1007/s10853-024-09673-7

Olarte-Paredes, A., Salgado-Delgado, J. N., Rubio-Rosas, E., Salgado-Delgado, A. M., Hernández-Cocoletzi, H., Salgado-Delgado, R., Moreno-Carpintero, E., & Castaño, V. M. (2021). Physico-chemical properties of a hybrid biomaterial (PVA/Chitosan) reinforced with conductive fillers. Applied Sciences (Basel, Switzerland), 11(7), 3040. https://doi.org/10.3390/app11073040

Pérez-Marroquin, X. A., Vargas-Torres, A., Campos-Montiel, R. G., Callejas-Quijada, G., Campos-Lozada, G., León-López, A., & Aguirre-Alvarez, G. (2022). Development of

a biomaterial based on chayotextle starch (Sechium Edule)-gelatin blend. Molecular, mechanical, physical, barrier and structural properties. Biotecnia, 24(3), 107–114. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i3.1682

Plasencia, L., Brdlík, P., Montanes, N., Gomez-Caturla, J., & Quiles-Carrillo, L. (2025). Innovative development of injection-molded biodegradable zein blends with xanthan gum. Industrial Crops and Products, 225(120475), 120475. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120475

Ranote, S., Kowalczuk, M., Guzenko, N., Duale, K., Chaber, P., Musioł, M., Jankowski, A., Marcinkowski, A., Kurcok, P., Chauhan, G. S., Chauhan, S., & Kumar, K. (2024). Towards scalable and degradable bioplastic films from Moringa oleifera gum/poly(vinyl alcohol) as packaging material. International Journal of Biological Macromolecules, 269(Pt 2), 132219. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132219

Raza, M., Abu-Jdayil, B., Banat, F., & Al-Marzouqi, A. H. (2022). Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from date palm waste. ACS Omega, 7(29), 25366–25379. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02333

Reddy, N., & Yang, Y. (2005). Structure and properties of high quality natural cellulose fibers from cornstalks. Polymer, 46(15), 5494–5500. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.04.073

Ross, G., Ross, S., & Tighe, B. J. (2016). Bioplastics: New routes, new products. En *Brydson's Plastics Materials: Eighth Edition* (pp. 631–652). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00023-

Sadh, P. K., Duhan, S., & Duhan, J. S. (2018). Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review. Bioresources and Bioprocessing, 5(1). https://doi.org/10.1186/s40643-017-0187-z

Sangsawang, P., Wisuttirattanamanee, C., Aueng-Aree, N., Thivasasith, A., Ittisanronnachai, S., Kaiyasuan, C., Ngamroj, P., Phophuttharaksa, N., Tanalikhit, P., Chavanalikigorn, N., & Mueanngern, Y. (2025). Bifunctional metavanadate promoted chitosan/cassava biopolymer films with photo-switchable wetting

properties: unveiling the surface restructuring mechanism. RSC Advances, 15(10), 7758–7768. https://doi.org/10.1039/d4ra08196j

Secretaría del Campo del Estado de México. (2023). *Primeros lugares de producción agrícola y florícola del Estado de México 2023*. Gobierno del Estado de México. Recuperado de https://secampo.edomex.gob.mx/sites/secampo.edomex.gob.mx/files/files/Produccion_Campo/Primeros_Lugares_Produccion_Agricola_Floricola_2023.pdf

Semple, K. E., Zhou, C., Rojas, O. J., Nkeuwa, W. N., & Dai, C. (2022). Moulded pulp fibers for disposable food packaging: A state-of-the-art review. Food Packaging and Shelf Life, 33(100908), 100908. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100908.

Sethulakshmi, A. G., & Saravanakumar, M. P. (2024). Sustainable papaya plant waste and green tea residue composite films integrated with starch and gelatin for active food packaging applications. International Journal of Biological Macromolecules, 260(Pt 1), 129153. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.129153

Seymour, R. B., & Carraher, C. E. (1995). *Introducción a la química de los polímetros*. Reverte.

Shanmathy, M., Mohanta, M., & Thirugnanam, A. (2021). Development of biodegradable bioplastic films from Taro starch reinforced with bentonite. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2(100173), 100173. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100173

Sidek, I. S., Draman, S. F. S., Abdullah, S. R. S., & Anuar, N. (2019). Current development on bioplastics and its future prospects: An introductory review. INWASCON Technology Magazine, 03–08. https://doi.org/10.26480/itechmag.01.2019.03.08

Sogut, E., & Cakmak, H. (2020). Utilization of carrot (Daucus carota L.) fiber as a filler for chitosan based films. Food Hydrocolloids, 106(105861), 105861. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105861

Sun, J., Zheng, H., Xiang, H., Fan, J., & Jiang, H. (2022). The surface degradation and release of microplastics from plastic films studied by UV radiation and mechanical

abrasion. The Science of the Total Environment, 838(156369), 156369. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156369

Szlachetka, O., Witkowska-Dobrev, J., Baryła, A., & Dohojda, M. (2021). Low-density polyethylene (LDPE) building films – Tensile properties and surface morphology. Journal of Building Engineering, 44(103386), 103386. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103386

Teo, H. L., & Wahab, R. A. (2020). Towards an eco-friendly deconstruction of agro-industrial biomass and preparation of renewable cellulose nanomaterials: A review. International Journal of Biological Macromolecules, 161, 1414–1430. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.076

Thecircularcampus, & Thecircularcampus. (2023, 11 enero). Norma UNE-EN 13432:2001 Envases y embalajes. Ecoembes | TheCircularCampus. https://www.ecoembesthecircularcampus.com/norma-une-en-134322001-envases-y-embalajes/

Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., McGonigle, D., & Russell, A. E. (2004). Lost at sea: where is all the plastic *Science (New York, N.Y.)*, *304*(5672), 838. https://doi.org/10.1126/science.1094559

Tomé, C. (2021, 8 febrero). Bioplásticos, no todos son biodegradables. Cuaderno de Cultura Científica. https://culturacientifica.com/2021/02/08/bioplasticos-no-todos-son-biodegradables/

Vigneswari, S., Noor, M. S. M., Amelia, T. S. M., Balakrishnan, K., Adnan, A., Bhubalan, K., Amirul, A.-A. A., & Ramakrishna, S. (2021). Recent advances in the biosynthesis of polyhydroxyalkanoates from lignocellulosic feedstocks. *Life (Basel, Switzerland)*, *11*(8), 807. https://doi.org/10.3390/life11080807.

Yun, D., Wang, Z., Li, C., Chen, D., & Liu, J. (2023). Antioxidant and antimicrobial packaging films developed based on the peel powder of different citrus fruits: A comparative study. *Food Bioscience*, *51*(102319), 102319. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102319

Yahia, R., Owda, M. E., Abou-Zeid, R. E., Abdelhai, F., Gad, E. S., Saleh, A. K., & El-Gamil, H. Y. (2022). Synthesis and characterization of thermoplastic starch/ PVA /cardanol oil composites loaded with in-situ silver nanoparticles. *Journal of Applied Polymer Science*, *139*(3), 51511. https://doi.org/10.1002/app.51511.

Zhang, W., Wang, T., Jiang, Z., Gao, X., Sun, C., & Zhang, L. (2024). Green preparation and functional properties of reinforced all-cellulose membranes made from corn straw. Membranes, 14(1), 16. https://doi.org/10.3390/membranes14010016

Zhang, M., Biesold, G. M., Choi, W., Yu, J., Deng, Y., Silvestre, C., & Lin, Z. (2022). Recent advances in polymers and polymer composites for food packaging. *Materials Today (Kidlington, England)*, *53*, 134–161. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2022.01.022

Waste management. (n.d.). European Bioplastics e.V. Retrieved May 21, 2023, from https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/waste-management/

Wic Baena, C. (2019). Obtención de plásticos biodegradables a partir de glicerina. https://bioplasticos.ies-ramonycajal.com/wp-content/uploads/2019/03/MEMORIA-PROYECTO-BIOPL%C3%81STICO-2.pdf