



**EFFECTO DE LOS TRATAMIENTOS QUIMICOS Y FISICOS SOBRE LAS
PROPIEDADES ESTRUCTURALES DE DESECHOS DE CASCARA DE PISTACHE Y SU
DESEMPEÑO EN MATRICES POLIMÉRICAS DEGRADABLES**

**BAJO LA OPCIÓN:
TITULACIÓN INTEGRAL
(TESIS PROFESIONAL)**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA:
ZURISHADAÍ ROMERO CERÓN**

**ASESOR INTERNO:
MTRO. FILEMON MONZALVO LICONA**

**SINODALES:
MTRA. ELODIA CLAUDIA GUERRERO ORTIZ
MTRA. MA. JUANA ARRIAGA GÓMEZ**

**ASESORES EXTERNOS:
DR. ISRAEL SIFUENTES NIEVES
DR. ERNESTO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ**

**Pachuca de Soto, Hgo. JUNIO 2024
49 páginas**



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta

C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.

Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399 e-
mail: cd_info@pachuca.tecnm.mx | www.pachuca.tecnm.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Pachuca
Subdirección Académica

Pachuca de Soto, Hidalgo, 12/Marzo/2025
Oficio No. DIQ/022/2025

Asunto: ACEPTACIÓN DE TEMA Y OPCIÓN

C. ZURISHADAI ROMERO CERON
PRESENTE

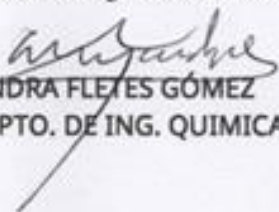
Con el presente me permito informarle que el tema EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS QUIMICOS Y FISICOS SOBRE LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES DE DESECHOS DE CASCARA DE PISTACHE Y SU DESEMPEÑO EN MATRICES POLIMÉRICAS DEGRADABLES ha sido ACEPTADO para ser presentado por la opción TITULACIÓN INTEGRAL (TESIS PROFESIONAL) contemplada en la normatividad vigente para tal efecto.

Lo anterior se le ha designado como ASESOR al MTRO. FILEMON MONZALVO LICONA y como comisión revisora a la MTRA. ELODIA CLAUDIA GUERRERO ORTIZ y MTRA. MA. JUANA ARRIAGA GÓMEZ. Una vez hecha la revisión final se liberará por dicho comité para su impresión y proceder a sustentar al ACTO DE RECEPCIÓN PROFESIONAL

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"


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



c.c.p. archivo
AFG/bfa



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta
C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.
Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399
e-mail: ciquimica@pachuca.tecnm.mx | www.pachuca.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Pachuca
Subdirección Académica

Pachuca de Soto, Hidalgo 18/Junio/2025

No. de Oficio: DIQ/022/2025

Asunto: Liberación para el Acto de Recepción Profesional

C. ZURISHADAÍ ROMERO CERÓN, No. de Control: 18200282
Egresada del Programa Educativo de Ingeniería Química y Bioquímica
PRESENTE

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

Nombre del Proyecto:	EFFECTO DE LOS TRATAMIENTOS QUIMICOS Y FISICOS SOBRE LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES DE DESECHOS DE CASCARA DE PISTACHE Y SU DESEMPEÑO EN MATRICES POLIMÉRICAS DEGRADABLES
Producto/Tema:	TITULACIÓN INTEGRAL (TESIS PROFESIONAL)

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE

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

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



c.c.p. Expediente.

ITPAC-AC-PO-008-06

Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta
C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.
Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399 e
mail: ciquimica@pachuca.tecnm.mx | www.pachuca.tecnm.mx



2025
Año de
La Mujer
Indígena



Agradecimientos técnicos

Al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), por permitirme realizar mi residencia profesional, facilitándome los equipos y materiales para realizar este proyecto.

Al Instituto Tecnológico de Pachuca por darme la formación profesional y la oportunidad de desarrollar mi proyecto de residencia en un gran centro de investigación.

Al Laboratorio Nacional en Innovación y Desarrollo de Materiales Ligeros para la Industria Automotriz (LANI-AUTO) del CONAHCYT por aportar el financiamiento y desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Ernesto Hernández Hernández, por recibirme en su equipo de trabajo y darme todas las herramientas necesarias para mi crecimiento personal. Gracias por todo el conocimiento que sembró en mí y por abrirme las puertas de CIQA y LANI-AUTO.

Al Dr. Israel Sifuentes Nieves, por darme la oportunidad de hacer mi residencia profesional en CIQA y la paciencia que me brindó en cada revisión de mi proyecto. Muchas gracias por confiar en mí y asignarme retos que me ayudaron a confiar en mi conocimiento.

Al Dr. Pablo González Morones, por su ayuda y capacitación en la búsqueda de artículos que fueron de ayuda para desarrollar esta tesis, también por todos los consejos brindados, así como también por el curso y capacitación de SCIFINDER.

A la Dra. Pamela Celeste Flores Silva, por regalarme su tiempo, conocimiento y paciencia al realizar el proceso experimental de mi proyecto. Agradezco el apoyo en la enseñanza del manejo de equipos como ultrasonido, extrusor y la elaboración de películas plásticas. Así como también la capacitación de “redacción de análisis de resultados” y “como leer y comprender artículos científicos”.

A la Dra. Zureima García Hernández, por brindarme el material necesario para desarrollar experimentaciones y también por todas las aportaciones a mi crecimiento profesional y personal.

A la Dra. Julieta Sánchez Salazar, por la capacitación brindada para trabajar con el equipo FTIR.

Agradecimientos personales

Agradezco a Dios quien ha guiado cada paso en mi camino, me ha dado fuerza, esperanza y paz cuando más lo he necesitado. Sanando mi corazón en las noches de incertidumbre y los días difíciles. *“Me presentaron a Dios en la iglesia, pero lo conocí en mi soledad, en mi proceso, en mi quebranto, en mi dolor.”*

A mi madre, Emma Cristina Cerón Delgado, quien ha sido mi mejor amiga y el amor de mi vida, gracias por darme todo a manos llenas y procurarme para que nunca me falte nada, por tener paciencia conmigo, por tus abrazos, por tus regaños y advertencias, por todos los días en que sanaste mi corazón, por consentirme y ser mi apoyo, por ser mi confidente y mi compañera de aventuras. Por ser la mejor mamá del mundo.

A mi padre, Gerardo Romero Muñoz, por apoyarme en cada paso que doy y alentarme a conseguir mis sueños, por amarme y estar para mí incondicionalmente, por los días de juegos llenos de risas, por los cafés en las noches y las pláticas de la vida, por ser mi cómplice.

A mi hermana, María José Romero Cerón, por ser mi otra mitad, por molestarme y reír conmigo, por los enojos, por enseñarme el amor más grande que existe, por ser mi incondicional, por ser la razón de muchos de mis sueños, por ser mi motivación y mis ganas de seguir.

A mi abuela, Irma Cristina Delgado Hernández, por ser mi todo, por financiar mis caprichos, por secundar mis travesuras, por fomentar mis sueños, por alentarme todos los días, por acompañarme en mis noches de desvelo, por aliviar mis días malos, por desaparecer mi estrés con sus consejos, por ser la mejor chef del mundo, por ser mi ejemplo de vida y fortaleza, por darme una vida llena de amor, por siempre tener un dicho para todo, por enseñarme a ser feliz y nunca dejarme sola.

A mi abuelo, Apolinar Cerón Vázquez, quien en vida dio todo y más por mí y mi familia, por ser mi fan número uno, por todas sus enseñanzas, por su amor incondicional, por enseñarme a dar todo por los que amas, por ser un hombre ejemplar, por cuidarme y amarme hasta el último día. Todo esto es por y para ti, este logro te lo dedico a ti, donde quiera que estés.

A mi familia que me quiere y celebra todos mis logros, gracias por tenerme siempre presente en sus pensamientos, quererme y aceptarme. Soy afortunada de tener una familia tan unida y resiliente, ¡Los quiero, familia muégano!

Al amor de mi vida, Araceli García Ordaz, por acompañarme durante estos 5 años como mi consejera, mi ayudante en tiempos de entregas finales, mi diseñadora personal para asesorarme en cómo realizar mis tareas y presentaciones. Nunca acabaría de agradecer todo el amor y apoyo brindado, en los días más oscuros siempre conté con tu consuelo, te amo para siempre, amor de todas mis vidas.

A mi roomie y amigo, César Augusto Reyes Bautista por las pláticas en la cena, por todas las risas, por los días de ocio, por el tiempo compartido y las anécdotas que quedarán marcadas en nuestras vidas. Gracias por regalarme palabras de consuelo en uno de mis momentos más fuertes, eres un gran amigo y agradezco a la vida por detonar la serie de casualidades que nos permitieron consolidar esta amistad. Infinitamente gracias, amigo.

A mi amigo Ernesto Alfonso García Gonzales por su calma y paciencia contagiable, gracias por darme un espacio en tu vida y compartirme tu conocimiento. Eres un gran amigo, me alegro de vivir esta experiencia a tu lado. Por más experiencias juntos.

A mi mejor amigo, Kevin Yair Pérez Vargas por siempre motivarme a dar lo mejor de mí, por ser mi persona, por aconsejarme y acompañarme en todo mi camino universitario. Gracias, amigo por ser tú conmigo, gracias por todos los momentos que hemos compartido juntos y los que faltan. Te quiero con el alma, me inspiras a seguir adelante, eres mi familia.

A mi mejor amiga, Eunice Daniela Mendoza Daniel quien ha fungido como mi 911 cuando las cosas salen mal. Gracias por ser parte de esta historia, por compartir conmigo todos los momentos de nuestras vidas, buenos y malos. Te amo y quiero dedicarte este logro a ti también, motivándote así a que en un futuro cercano cumplas también todas tus metas. Eres una mujer fuerte y extremadamente inteligente, afortunada soy por haberte escogido como mi cómplice.

“No son los más fuertes de la especie los que sobreviven, ni los más inteligentes. Sobreviven los más flexibles y adaptables al cambio” – Charles Darwin

Resumen.

Este estudio investiga los cambios en las características estructurales de los desechos de cáscara de pistacho (PS) tras el tratamiento alcalino y por ultrasonidos y su potencial como rellenos de refuerzo sostenibles en películas a base de almidón (SF). El análisis SEM reveló grabado, adelgazamiento y cavidades en la superficie del PS después del tratamiento alcalino/ultrasonido, lo que permitió que las especies de NaOH actuaran internamente en la microestructura del PS, promoviendo la alteración de los grupos funcionales C=O y C-O de las moléculas de hemicelulosa y lignina, así como aumentando su índice de cristalinidad de 31.41% hasta 46.91%. Además, se utilizó el análisis XPS para identificar el mecanismo de oxidación una vez que el PS modificado se agregó a una matriz de almidón, encontrando que la relación atómica de los grupos hidroxilo disminuyó, lo que llevó a un aumento en las interacciones más fuertes de O-C=O (de 5.98 a 17.91%) y enlaces O=C (de 15 a 27.49%). El análisis TGA confirmó la alta interacción entre el almidón y el PS modificado, lo que aumentó el módulo de almacenamiento de las películas de 198 MPa a 721 MPa, aumentando así la rigidez en mayor medida. La mejora de la compatibilidad entre los desechos de PS modificado y el almidón puede ser de interés para la industria del embalaje y para aquellos que buscan desarrollar un proceso escalable.

Palabras clave: Cáscara de pistache, almidón, ultrasonido, tratamiento alcalino

Abstract.

This study investigates the changes in structural features of the pistachio shell (PS) waste upon alkaline and ultrasound treatment and their potential as sustainable reinforcement fillers in starch-based films (SF). SEM analysis revealed etching, thinning, and cavities on the surface of PS after alkaline/ultrasound treatment, which allowed the NaOH species to act internally on the microstructure of PS, promoting the alteration of the functional groups C=O and C-O of hemicellulose and lignin molecules, as well as increased their crystallinity index from 31.41% up to 46.91%. Furthermore, XPS analysis was used to identify the oxidation mechanism once the modified PS was added into a starch matrix, finding that the atomic ratio of the hydroxyl groups decreased, leading to an increase in the stronger O-C=O (from 5.98 to 17.91%) and O=C bonds (from 15 to 27.49%) interactions. TGA analysis confirmed the high interaction between starch and modified PS, which increased the storage modulus of the films from 198 MPa up to 721 MPa, thereby increasing the rigidity to a higher extent. The compatibility enhancement between modified PS waste and starch may be of interest to the packaging industry and those looking to develop a scalable process.

Keywords: Pistachio shell, starch, ultrasound, alkaline treatment

Índice

Agradecimientos técnicos	i
Agradecimientos personales	ii
Resumen.	iv
Abstract.	v
Índice de contenido.....	vi
Abreviaturas y simbología.....	viii
Índice de figuras.	ix
Índice de tablas.	x
1 GENERALIDADES	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivo general	3
1.3. Objetivos específicos	3
1.4. Justificación.....	3
2 FUNDAMENTO TEÓRICO Y ANTECEDENTES	4
2.1 Compuestos poliméricos.....	5
2.1.1 Fase continua.....	5
2.1.2 Fase dispersa.	5
2.2 Biopolímero.....	6
2.2.1 Ventajas y desventajas de los bioplásticos.....	7
2.2.2 Almidón.	8
2.3 Fibras lignocelulósicas.....	10
2.3.1 Celulosa.....	11
2.3.2 Hemicelulosa.....	12
2.3.3 Lignina	14
2.4 Pistacia Vera.....	15
2.5 Compuestos poliméricos con fibras naturales	17
2.6 Compuestos poliméricos con pistacia vera.	18
2.7 Compuestos a base de almidón termoplástico (ATP) con lignocelulosa.	19
3 METODOLOGÍA	22
3.1 Materiales.	23
3.1.1 Almidón.	23
3.1.2 Cáscaras de pistache.....	23
3.1.3 Hidróxido de sodio (NaOH).	23

3.1.4	Glicerol.....	23
3.2	Lavado de las cáscaras de pistache.	23
3.3	Obtención de la harina de cáscara de pistache.	23
3.4	Tratamiento NaOH y ultrasonido.....	23
3.5	Elaboración de películas.	24
3.6	Métodos.....	24
3.6.1	FTIR.....	24
3.6.2	TGA.	24
3.6.3	DSC.....	24
3.6.4	DRX.	24
3.6.5	SEM.....	25
3.6.6	DMA.....	25
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	26
4.1	Caracterización de las fibras de cáscara de pistache.	27
4.1.1	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	27
4.1.2	Análisis termogravimétrico (TGA).....	28
4.1.3	Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	31
4.1.4	Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	32
4.1.5	Difracción de rayos X (DRX).....	33
4.2	Caracterización de películas.	34
4.2.1	FTIR.....	34
4.2.2	DRX.....	35
4.2.3	XPS.	36
4.2.4	TGA.....	38
4.2.5	DMA.....	39
5	CONCLUSIONES.....	41
6	BIBLIOGRAFÍA.....	42
7	ANEXOS.....	48
7.1	Carta de aceptación. Fuente: Carta de aceptación proporcionada por CIQA, 2024.....	48
7.2	Carta de terminación. Fuente: Carta de aceptación proporcionada por CIQA, 2024.....	49

Abreviaturas y simbología

PS – Cáscara de pistache nativa

APS – Cáscara de pistache con tratamiento alcalino

UPS – Cáscara de pistache con tratamiento de ultrasonido

AUPS – Cáscara de pistache con tratamiento dual (alcalino/ultrasonido)

SF – Película de almidón

SF-PS – Película de almidón con cáscara de pistache nativa

SF-APS – película de almidón con cáscara de pistache con tratamiento alcalino

SF-UPS – Película de almidón con cáscara de pistache con tratamiento de ultrasonido

SF-AUPS – Película de almidón con cáscara de pistache con tratamiento dual

FTIR – Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

TGA – Análisis termogravimétrico

SEM – Microscopía electrónica de barrido

DSC – Calorimetría diferencial de barrido

DRX – Difracción de rayos X

DMA – Análisis dinámico mecánico

Índice de figuras.

Núm.	Título.	Pág.
Figura 2.1	Clasificación de biopolímeros. Creación propia Z. Romero, 2024.....	7
Figura 2.2	(a); estructura de la amilosa (b); estructura de la amilopectina. Fuente: (Pinos, 2019)	10
Figura 2.3	Clasificación de fibras naturales. Fuente: (Shaker & Nawab, n.d.).....	11
Figura 2.4	Estructura de la celobiosa, monómero de celulosa. Fuente: (Shaker & Nawab, n.d.).	12
Figura 2.5	Estructura de la hemicelulosa. Fuente: (Shaker & Nawab, n.d.).	13
Figura 2.6	Unidades monoméricas en hemicelulosas. Fuente: (Popescu, 2017).....	13
Figura 2.7	Estructura de la lignina. Fuente: (Shaker & Nawab, n.d.).	14
Figura 2.8	Unidades de fenilpropano: (A) p-hidroxifenilo, (B) guaiacilo y (C) siringilo. Fuente: (Popescu, 2017).	15
Figura 2.9	Árbol de pistacia vera. Fuente: (Roc, s. f.).....	16
Figura 4.1	Espectro FTIR de fibras de cáscara de pistache sin tratar y tratadas con método alcalino y ultrasonido. Creación propia Z. Romero, 2024.	28
Figura 4.2	(a) termograma de la pérdida de peso de muestras de cáscara de pistache nativa y modificadas, (b) derivada para pérdida de masa de cáscaras de pistache nativa y modificadas. Creación propia Z. Romero, 2024.	29
Figura 4.3	SEM cáscara de pistache para muestras nativa y modificadas, (a) PS (b) APS (c) UPS (d) AUPS. Creación propia Z. Romero, 2024.....	31
Figura 4.4	Termogramas DSC de polvo de cáscara de pistache nativo y modificado. Creación propia Z. Romero, 2024.....	33
Figura 4.5	Difractograma de rayos X de polvo de cáscara de pistache nativo y modificados. Creación propia Z. Romero, 2024.....	34
Figura 4.6	Análisis de FTIR para películas de almidón con polvo cáscara de pistache nativo y modificado. Creación propia Z. Romero, 2024.....	35
Figura 4.7	Patrón de difracción de rayos X de películas de almidón con cáscara de pistache nativa y modificada. Creación propia Z. Romero, 2024.	36
Figura 4.8	Picos C1s y O1s desconvolucionados de películas a base de almidón que contienen cáscaras de pistache nativas y modificadas. Fuente: (I. Sifuentes, 2024).....	37
Figura 4.9	Análisis TGA de películas de almidón que contienen PS modificado y no modificado. Creación propia Z. Romero, 2024.....	38
Figura 4.10	Gráficos del análisis DMA para las películas de almidón y cáscara de pistache nativa y modificada. Creación propia Z. Romero, 2024.	40

Índice de tablas.

Núm.	Título.	Pág.
	Tabla 2.1 Clasificación de las matrices. Modificado de (Ghosh & Dwivedi, 2019).....	5
	Tabla 2.2 Clasificación de fibras utilizadas como refuerzos. Fuente: (Ghosh & Dwivedi, 2019).	6
	Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de biopolímeros y polímeros convencionales. Fuente: (Sidek et al., 2019a).....	8
	Tabla 2.4 Composición de la cáscara de pistache. Generación propia con información tomada de (Čolnik et al., 2024).	16
	Tabla 2.5 Fibras naturales en el mundo y su producción mundial. Modificado de (Mohammed et al., 2015).....	17
	Tabla 2.6 Artículos relevantes con respecto al ATP reforzado con residuos lignocelulósicos. Creación propia Z. Romero, 2024.	20
	Tabla 4.1 Composición de las fibras de cáscara de pistache PS, APS, UPS y AUPS. Creación propia Z. Romero, 2024.	30
	Tabla 4.2 Cristalinidad del polvo de cáscara de pistache nativo y modificados. Creación propia Z. Romero, 2024.	34
	Tabla 4.3 Cristalinidad de películas de almidón con cáscara de pistache nativa y modificada. Creación propia Z. Romero, 2024.	36
	Tabla 4.4 Picos C1s y O1s de películas a base de almidón que contienen cáscaras de pistacho nativas y modificadas. Fuente: (I. Sifuentes, 2024).....	37
	Tabla 4.5 Degradación de películas de almidón con PS nativa y modificada. Creación propia Z. Romero, 2024.	39

1 GENERALIDADES

Este capítulo expone aspectos generales que sustentan la realización de este proyecto de tesis de licenciatura, tales como introducción, justificación, hipótesis, objetivo general y objetivos específicos, con el fin de facilitar una mejor comprensión del documento.

1.1. Introducción

Los residuos agrícolas contienen una gran cantidad de compuestos lignocelulósicos que son muy útiles para diversas aplicaciones biotecnológicas. Sin embargo, si estos desechos no se gestionan adecuadamente, pueden generar serios problemas de contaminación ambiental y en la salud del ecosistema. Entre los principales residuos lignocelulósicos se encuentran aquellos provenientes de la madera, la agricultura y la silvicultura. Estos materiales son especialmente abundantes y poseen un gran potencial para ser transformados mediante procesos de bioconversión. La bioconversión es un método que permite aprovechar estos residuos, proporcionando significativos beneficios tanto ambientales como económicos (Ibarra-Islas et al., 2023). Este proceso no solo ayuda a reducir el impacto negativo de los residuos en el medio ambiente, sino que también puede generar productos valiosos y contribuir a la economía circular, fomentando un uso más sostenible y eficiente de los recursos naturales.

Uno de los residuos industriales y agrícolas más significativos es la cáscara de pistache. El pistache (*Pistacia vera* L.), perteneciente a la familia Anacardiaceae, es un cultivo de gran relevancia a nivel mundial. En 2020, la producción global de pistacho alcanzó los 1.1 millones de toneladas. Aproximadamente entre el 35% y el 45% de los residuos generados por la industria del pistache corresponden a la cáscara. Este subproducto, si no se gestiona adecuadamente, puede causar serios problemas ambientales como la producción de metano, un gas de efecto invernadero, que contribuye a las emisiones de gases al medio ambiente y además produce riesgos para la salud pública (Benli & Bahtiyari, 2024).

Por lo tanto, es imperativo eliminar las cáscaras de pistache de manera segura, económica y amigable con el medio ambiente. Gracias a su estructura lignocelulósica y el volumen en el que se generan, las cáscaras de pistache pueden transformarse en productos de alto valor añadido, como carbón activado, biocombustibles y otros bioproductos. La reutilización de estos residuos no solo ofrece una solución sostenible para su gestión, sino que también puede generar beneficios económicos y contribuir a la reducción de la huella ambiental de la industria del pistache. Explorar y desarrollar estas alternativas de valorización es esencial para promover una economía circular y sostenible.

Por otra parte, los residuos de plásticos convencionales contribuyen también a la contaminación del medio ambiente y, de acuerdo con la Asociación Nacional de Industrias del Plástico A.C. (ANIPAC), el consumo aparente de plásticos en México es de 5,917,000 ton. En 2023, la ONU reportó que, cada año se producen más de 400 millones de toneladas de plástico, y menos del 10% se recicla. Se estima que entre 19 y 23 millones de toneladas de desechos plásticos terminan en lagos, ríos y mares, causando un grave impacto ambiental.

A raíz de esta problemática surgen alternativas para mitigar el impacto ambiental de los desechos plásticos como lo es la elaboración de biocompuestos elaborados con polímeros degradables (biopolímeros). Los biopolímeros son de origen natural, se producen a partir de fuentes biológicas renovables, como plantas, animales o microorganismos. A diferencia de los polímeros sintéticos derivados del petróleo, los biopolímeros son generalmente biodegradables y pueden descomponerse de manera más amigable con el medio ambiente. Estos materiales pueden ser utilizados en una amplia gama de aplicaciones, desde envases y embalajes hasta dispositivos médicos y textiles, ofreciendo una alternativa sostenible a los plásticos convencionales.

Una de las alternativas de aplicación de la cáscara de pistache es mediante su uso para reforzar matrices poliméricas y biopoliméricas. En estos últimos materiales biodegradables se ha demostrado que la cáscara de pistache mejora las propiedades mecánicas, térmicas y estructurales de las matrices.

En el presente trabajo se elaboraron películas de almidón termoplástico de maíz reforzadas con cáscara de pistache nativa y modificada por método alcalino y ultrasonido y se caracterizó la cáscara de pistache después de los tratamientos para evaluar el efecto sobre sus propiedades. También se realizaron pruebas de caracterización a las películas de almidón para determinar el grado de reforzamiento adhesión interfacial entre la fase dispersa y fase continua.

1.2. Objetivo general

- Evaluar el efecto de la cáscara de pistache modificada, mediante análisis experimentales y caracterización avanzada, sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales de matrices poliméricas degradables, con el propósito de optimizar su desempeño y promover su aplicación en materiales sostenibles.

1.3. Objetivos específicos

- Determinar el efecto de un agente químico alcalino sobre la estructura de la cáscara de pistache, mediante análisis estructurales y caracterización química, para comprender las modificaciones que sufre su superficie y composición.
- Investigar la influencia de la tecnología de ultrasonido en el tratamiento de residuos de cáscara de pistache, aplicando ensayos de ultrasonido controlado, para favorecer su modificación estructural.
- Examinar la composición química y la estructura de la cáscara de pistache sometida a modificaciones físicas y químicas, utilizando técnicas de caracterización, para identificar las transformaciones inducidas por los procesos aplicados.
- Desarrollar un biocompuesto degradable mediante la incorporación de cáscara de pistache en una matriz polimérica, empleando técnicas de elaboración de materiales compuestos, para generar una solución funcional.
- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y funcionales del biocompuesto elaborado con cáscara de pistache, empleando ensayos específicos de resistencia, para validar su desempeño en aplicaciones sostenibles.

1.4. Justificación.

En los últimos años, la investigación en polímeros ha enfocado sus esfuerzos en el cuidado del medio ambiente debido a los problemas asociados con los desperdicios de polímeros sintéticos y residuos agroindustriales. Una de las medidas aplicadas es la elaboración de plásticos que tengan la característica de ser biodegradables. El almidón, un biopolímero natural, ha emergido como una opción prometedora debido a su abundancia, bajo costo y biodegradabilidad. Sin embargo, el bajo desempeño mecánico y de barrera al agua de estos materiales ha retrasado su aplicación tecnológica. Basado en lo anterior, en este trabajo se propone el uso de tratamientos químicos y físicos para modificar desechos de cáscara de pistache y mejorar su compatibilidad con la matriz de almidón termoplástico, para obtener materiales biodegradables funcionales.

2 FUNDAMENTO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

Este capítulo abordará los antecedentes y el fundamento teórico que respaldan este trabajo de tesis de licenciatura. En él se presentarán conceptos, definiciones, datos, imágenes, entre otros elementos, con el propósito de proporcionar una mejor comprensión del objetivo del documento.

2.1 Compuestos poliméricos.

Anup K. Ghosh define los compuestos como sustancias o estructuras que consisten en dos o más fases físicamente diferentes, y las propiedades que exhiben son más destacadas que las de las fases individuales que los componen. Los compuestos de matriz polimérica se componen de refuerzo y matriz. La matriz es la fase continua y el refuerzo es la fase dispersa (Ghosh & Dwivedi, 2019).

Desde tiempos antiguos, se ha observado que los ladrillos de arcilla pueden ser fortalecidos y prolongar su durabilidad mediante el refuerzo con paja y palos. Asimismo, la naturaleza ofrece numerosos ejemplos de compuestos, como la madera y los huesos. La madera, compuesta por resistentes fibras de celulosa entrelazadas con lignina, y los huesos, conformados por fibras de colágeno cortas y flexibles incrustadas en una matriz mineral, ilustran la sorprendente adaptabilidad y capacidad de los materiales compuestos para resistir cargas bajo diversas condiciones (Sheikh-Ahmad, n.d.).

2.1.1 Fase continua.

La matriz, que constituye la parte continua y generalmente más abundante de un material compuesto, se encarga de unir y encapsular el refuerzo. Se considera comúnmente que son las propiedades de la matriz las que se ven mejoradas al integrar otro componente para formar un compuesto. La función principal de la matriz es encapsular al refuerzo, distribuyendo de manera efectiva las cargas aplicadas y protegerlas tanto del entorno externo como de condiciones adversas (Sheikh-Ahmad, n.d.).

Las matrices poliméricas se clasifican de manera general como: no biodegradable y biodegradable tal y como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Clasificación de las matrices. Modificado de (Ghosh & Dwivedi, 2019).

Tipo de matrices	Materiales de matriz
Matrices biodegradables	Ácido poliláctico (PLA), policaprolactona (PCL), polihidroxibutirato (PHB).
Matrices no biodegradables	Matrices termoplásticas: Nylon, policarbonato, polipropileno, poliuretano, polieterimida (PEI), poliéter éter cetona (PEEK), etc. Matrices termoeestables: epoxi, fenol formaldehído, bismaleimida, poliéster insaturado,

2.1.2 Fase dispersa.

El segundo elemento presente en un compuesto es la fase dispersa o normalmente denominada como refuerzo, generalmente fabricada con un material más robusto y rígido que la matriz. Esta fase es la principal encargada de soportar cargas dentro del material compuesto, y su forma, volumen, distribución y concentración pueden influir considerablemente en sus propiedades. Los refuerzos pueden adoptar diversas formas, como fibras largas, fibras cortas, partículas o estructuras tipo bigotes (Sheikh-Ahmad, n.d.).

El refuerzo se divide en dos categorías: fibras naturales y fibras sintéticas. A nivel global, existe un creciente interés en el desarrollo de compuestos ecológicos que emplean fibras naturales como refuerzo y matrices biodegradables. Las fibras naturales ofrecen una diversidad de opciones para este propósito (Ghosh &

Dwivedi, 2019). La clasificación detallada de fibras naturales y sintéticas se presenta de manera resumida en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Clasificación de fibras utilizadas como refuerzos. Fuente: (Ghosh & Dwivedi, 2019).

Tipo de fibras	Materiales de reforzamiento
Fibras naturales	Yute, cáñamo, sisal, algodón, fibra de coco, bambú, lino, kenaf, hoja de plátano, etc.
Fibras sintéticas	Fibras de bajo punto de fusión (termoplásticas): Nylon, UHMWPE, polipropileno, poliéster PEEK, poliuretano, etc. Fibras de alto punto de fusión: Fibra de vidrio, fibra de carbono, fibras de Kevlar, fibras de basalto, etc.

2.2 Biopolímero.

Los biopolímeros, también conocidos como polímeros biobasados, también son materiales plásticos pero su principal diferencia es que se obtienen de fuentes renovables y naturales (figura 2.1). Lo más habitual es que procedan de residuos agrícolas, de celulosa o almidón de patata o maíz.

Concretamente, se pueden obtener biopolímeros de diferentes hidratos de carbono. Por ejemplo, azúcar, almidón, celulosa, lignina, grasas o aceites. Algunos ejemplos de biopolímeros son el ácido poliláctico (PLA), polihidroxibutirato (PHB), derivados de celulosa (CA, CAB) y derivados de almidón.

El biopolímero de origen vegetal se puede caracterizar como almidón, celulosa, hemicelulosa y lignina. El almidón es el componente principal de la estructura del biopolímero, que actúa como matriz y, con la adición de plastificantes, se mejora aún más la flexibilidad y procesabilidad del almidón termoplástico (TPS) resultante (Diyana et al., 2021a).

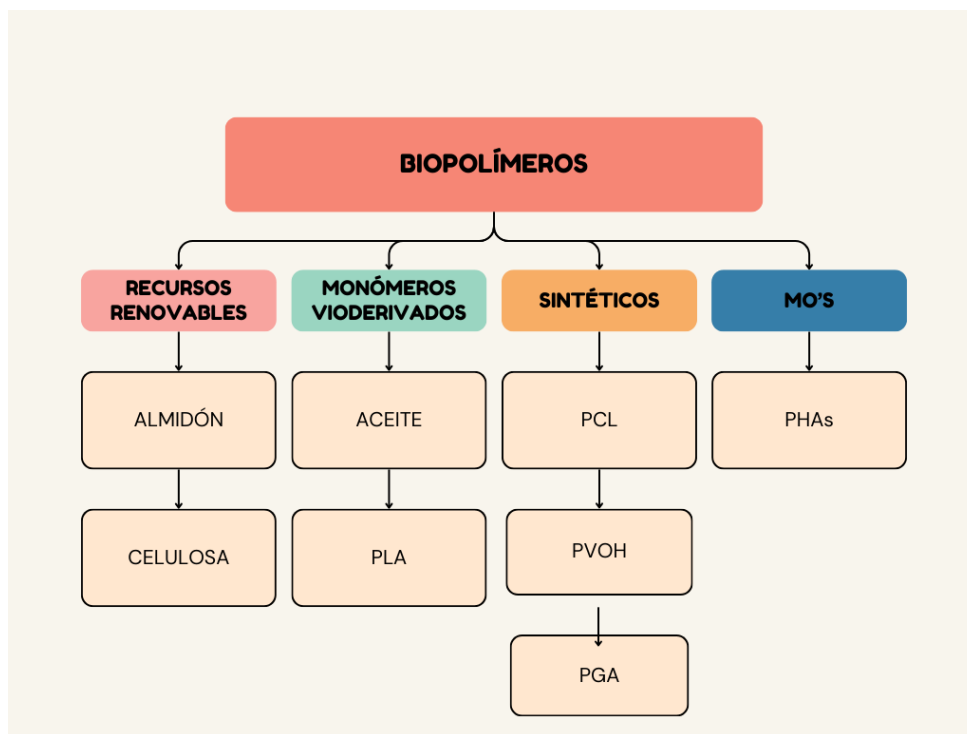


Figura 2.1 Clasificación de biopolímeros. Creación propia Z. Romero, 2024

2.2.1 Ventajas y desventajas de los bioplásticos.

Los biopolímeros presentan varias desventajas, como una alta permeabilidad al vapor de agua y al oxígeno, fragilidad, baja resistencia térmica, propiedades mecánicas deficientes, vulnerabilidad a la degradación y dificultades en su procesamiento (Abe et al., 2021). En la Tabla 2.3 se muestran las ventajas y desventajas más significativas de los biopolímeros con respecto a polímeros convencionales.

Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de biopolímeros y polímeros convencionales. Fuente: (Sidek et al., 2019a).

Tipo	Ventajas	Referencia	Desventajas	Referencia
Biopolímeros	Sostenible	(Abe et al., 2021)(Sidek et al., 2019b)	Costoso	(Ezgi Bezirhan Arian & Havva Duygu Ozsoy, 2015)
	Reducción de la huella de carbono	(Www et al., 2008)(Sidek et al., 2019b)(Muhammad Shamsuddin, 2017)	Inestabilidad térmica	(Jabeen et al., 2015)
	Reducir la eficiencia energética	(Www et al., 2008)(Sidek et al., 2019b)(Muhammad Shamsuddin, 2017)	Problema de reciclaje	(Ezgi Bezirhan Arian & Havva Duygu Ozsoy, 2015)
	Basado parcialmente en materia prima natural.	(Ezgi Bezirhan Arian & Havva Duygu Ozsoy, 2015)	Fragilidad	(Jabeen et al., 2015)
Polímeros convencionales	Bajo costo	(Sidek et al., 2019a)	Basado en petroquímicos	(Sidek et al., 2019a)
	Buenas y excelentes propiedades técnicas.	(Andrady & Neal, 2009; Sidek et al., 2019a)	Acopio limitado y separación compleja	(Sidek et al., 2019a)
	Pueden ahorrar energía y recursos	(Andrady & Neal, 2009; Sidek et al., 2019a)	Mayormente no biodegradable	(Sidek et al., 2019a)
	Posibilidad de reciclaje térmico	(Sidek et al., 2019a)	La combustión incontrolada puede liberar sustancias tóxicas.	(Sidek et al., 2019a)

2.2.2 Almidón.

El almidón es un polisacárido de reserva energética de los vegetales y se localiza principalmente en cereales, leguminosas, raíces, tubérculos, frutas y semillas. El almidón está compuesto fundamentalmente por dos biopolímeros de glucosa: amilosa y amilopectina, además de una fracción minoritaria (de 1% a 2%) de formación no glucosídica como lípidos, proteínas, compuestos inorgánicos (figura 2.2). La mayoría de los almidones nativos están conformados por un 20 % de amilosa y 80 % de amilopectina (Química Del Almidón, n.d.). Existen también los almidones cerosos que están constituidos básicamente de amilopectina. La gelatinización de los almidones cerosos se ve influenciada por el tamaño molecular y la longitud de las cadenas ramificadas de la amilopectina. Los gránulos hinchados tienden a disolverse más rápidamente que el almidón normal, ya que una mayor proporción de amilosa limita la expansión completa de los gránulos.

El almidón de arroz ceroso tiene una temperatura máxima de gelatinización de 67.6 °C, seguido por el almidón de maíz 68 °C y el almidón de maíz ceroso 69.7 °C, y el almidón de arroz nativo tiene una temperatura máxima de gelatinización muy alta de 75.7 °C. (Šárka & Dvořáček, 2017)

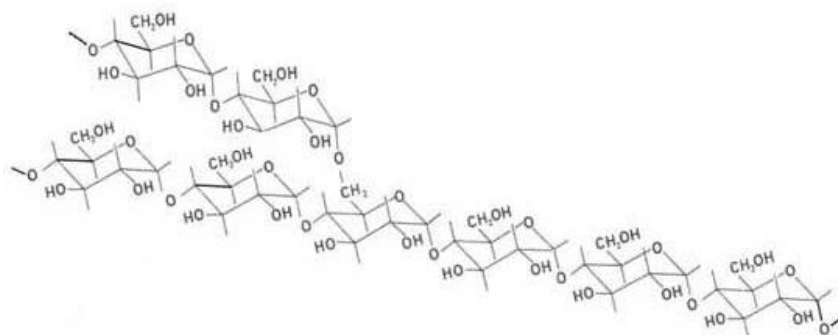


Figura 1.2 Estructura del almidón. Fuente: (ESTRUCTURA DEL ALMIDON, s. f.)

La amilosa consiste en cadenas predominantemente lineales (Ver Figura 2.3). La amilosa suele estar ramificada en un nivel bajo (aproximadamente una rama por cada 1000 unidades monoméricas) mediante enlaces y constituye aproximadamente el 30% del almidón. Esta proporción, sin embargo, puede variar considerablemente según la especie de la planta (por ejemplo, se encontró un intervalo del 11 al 35% en un estudio de 51 especies) y la variedad (se encontró un intervalo del 20 al 36% en un estudio de 399 variedades de maíz) (Martinl & Smith, 1995).

Por otra parte, la amilopectina, que consta de cadenas de glucano altamente ramificadas, constituye el 70% del almidón. Cada 20 unidades de glucosa normalmente están unidas a otras ramas, dando a la amilopectina una estructura organizada. Algunas no están sustituidas en las seis posiciones y se denominan cadenas tipo A. Estas cadenas están unidas a ramas internas (cadenas tipo B), que pueden estar ramificadas en uno o varios puntos. Una sola cadena por molécula de amilopectina tiene un extremo reductor libre (la cadena tipo C). Las ramas no están organizadas al azar, sino que se agrupan en intervalos de 7 a 10 nm. Una molécula de amilopectina promedio tiene de 200 a 400 nm de largo (20 a 40 grupos) y 15 nm de ancho (Kainuma, 2012).

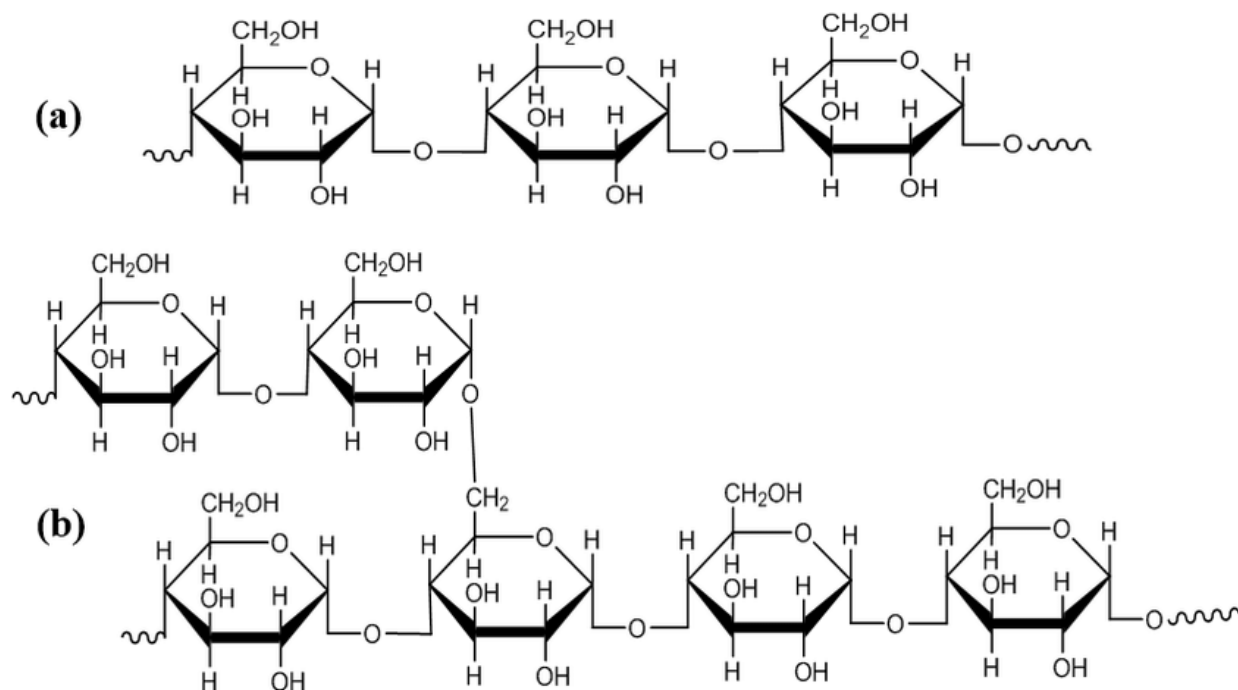


Figura 2.2 (a); estructura de la amilosa (b); estructura de la amilopectina. Fuente: (Pinos, 2019)

Las propiedades fisicoquímicas del almidón dependen del contenido de humedad presente en el almidón. Uno de los fenómenos más importantes que se ha estudiado en el almidón es la gelatinización (propiedad hidrotérmica) específicamente para el almidón de maíz presenta una temperatura de gelatinización de 62-72 °C (Química Del Almidón, n.d.). Para el caso de los almidones cerosos presentan otras temperaturas de gelatinización, en lo referente a las propiedades reológicas la viscosidad del almidón durante la gelatinización depende del peso molecular.

Por otra parte, El contenido de amilosa, la cristalinidad, la temperatura de transición vítrea, los tipos y contenidos de plastificantes y las fuentes de almidón son factores importantes que rigen las propiedades mecánicas (Gupta, Brennan, & Tiwari, 2012).

La entalpía para la gelatinización y el grado de retrogradación de varios tipos de almidón de maíz varían de 11.2 a 12.7 J/g y de 37.6% a 56.5%, respectivamente. La viscosidad máxima varía entre 804 y 1252 cP en diferentes variedades. La firmeza de los geles de almidón se encuentra en un rango de 21.5 a 32.3 g (Nguyen Vu & Lumdubwong, 2016).

2.3 Fibras lignocelulósicas.

Fibras lignocelulósicas son un nombre científico que se refiere a las fibras naturales, ya que todas las fibras vegetales están formadas principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina (Hao et al., 2018). Convencionalmente, estas fibras se clasifican ampliamente en tres categorías (Figura 2.4): fibras de liber, fibras de semillas y fibras de hojas. Algunos investigadores también han clasificado las fibras vegetales en primarias y secundarias, en función de las plantas de las que se obtienen. Las plantas primarias son aquellas que se cultivan para obtener fibras, mientras que las plantas secundarias son las que producen fibras como

subproducto. El yute, el sisal, el kenaf, el cáñamo, etc. son ejemplos de plantas primarias, mientras que la piña, la fibra de coco, la palma aceitera, el plátano, etc. son ejemplos de plantas secundarias.

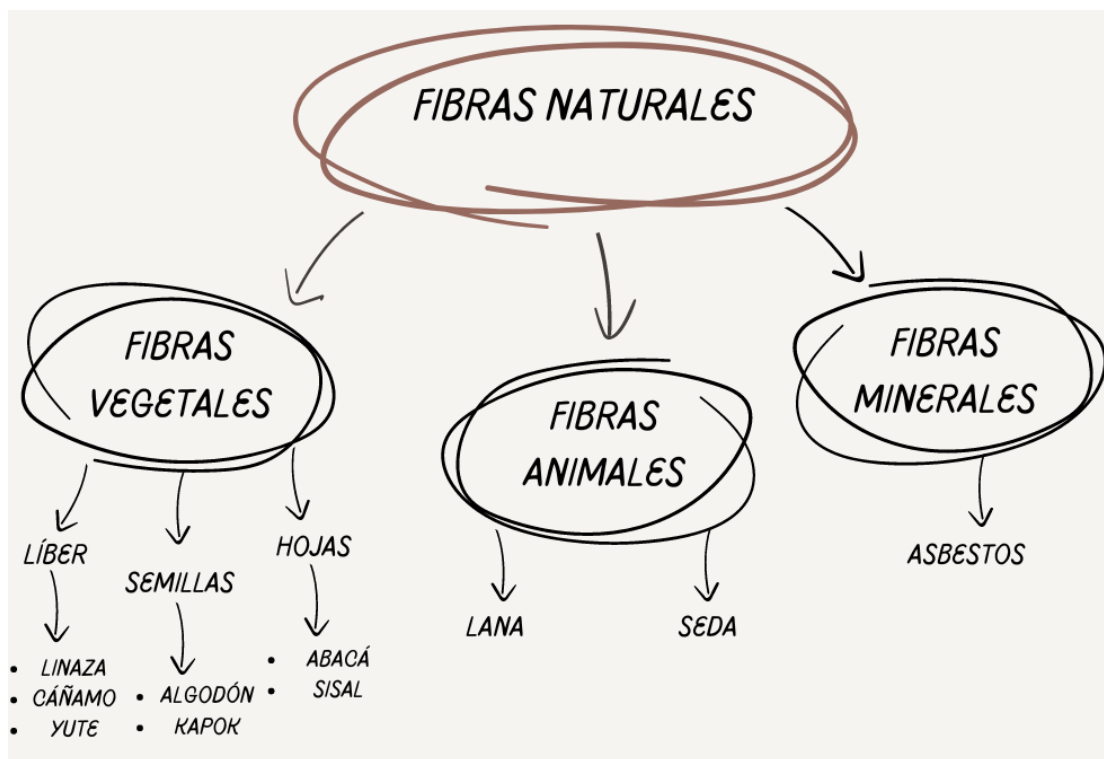


Figura 2.3 Clasificación de fibras naturales. Fuente: (Shaker & Nawab, n.d.)

Los constituyentes de las fibras lignocelulósicas incluyen celulosa, hemicelulosas, lignina, cenizas, pectinas y ceras. La fracción relativa de estos componentes varía según el origen de la fibra. Los materiales fibrosos ricos en estos constituyentes también se denominan fibras lignocelulósicas (Shankaran, 2018). La celulosa es el constituyente principal de todas las fibras lignocelulósicas y contribuye entre el 50% y el 70% de la fibra; la hemicelulosa tiene una estructura de cadena ramificada y es el constituyente más abundante después de la celulosa y la lignina tiene una estructura amorfa muy compleja y está llena el espacio entre la celulosa y la hemicelulosa, actuando así como material cementante (Shaker & Nawab, n.d.).

2.3.1 Celulosa

La celulosa es un polisacárido de cadena lineal compuesto de C, H y O, y se considera el constituyente principal de todas las fibras lignocelulósicas. La cadena de celulosa está compuesta de unidades repetidas de glucosa unidas β -(1,4). Las dos moléculas de glucosa están unidas de tal manera que las moléculas de glucosa consecutivas giran 180° . Las dos moléculas de glucosa de 180° juntas forman una unidad de celobiosa (Figura 2.5), que es la unidad repetitiva de la celulosa. Teniendo una fórmula genérica de $(C_6H_{10}O_5)_n$ (Shaker & Nawab, n.d.).

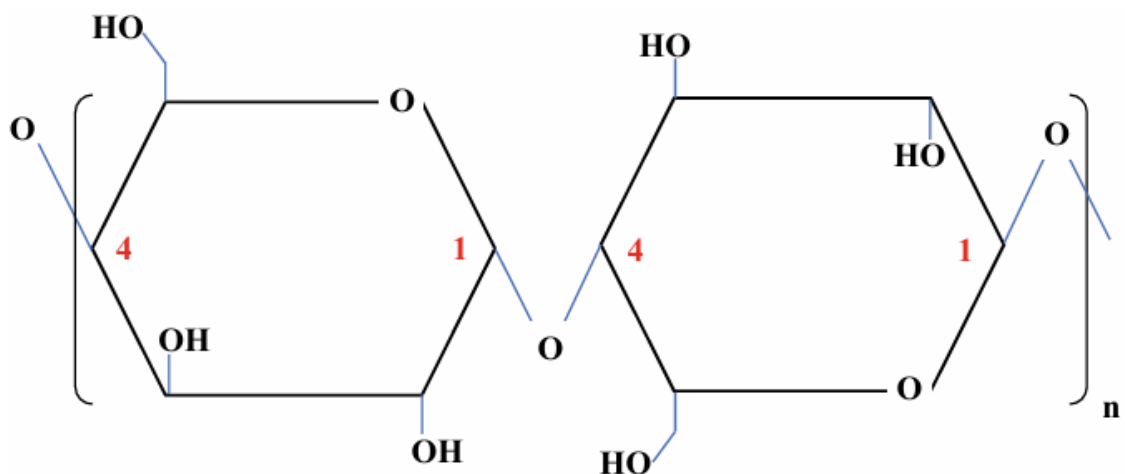


Figura 2.4 Estructura de la celobiosa, monómero de celulosa. Fuente: (Shaker & Nawab, n.d.).

Las propiedades de la fibra vegetal están determinadas por el contenido de celulosa de las fibras. La celulosa es el componente más fuerte y rígido de la fibra, la naturaleza altamente hidrófila de las fibras lignocelulósicas se debe a la presencia de grupos hidroxilo ($-OH$) en la cadena de celulosa (Shankaran, 2018).

2.3.2 Hemicelulosa

La estructura de la hemicelulosa (Figura 2.6) es compleja y compuesta por diversas unidades de azúcares de distintos tipos de pentosas, hexosas y ácido glicólico. Los grupos monosacáridos de la hemicelulosa están unidos por enlaces glicosídicos, y frecuentemente presentan una estructura principal conformada por una única unidad de azúcar repetida, conectada por puntos de ramificación (1-2), (1-3) y/o (1-6). Además, en la hemicelulosa pueden encontrarse grupos sustituidos con acetilo y metilo (Shaker & Nawab, n.d.).

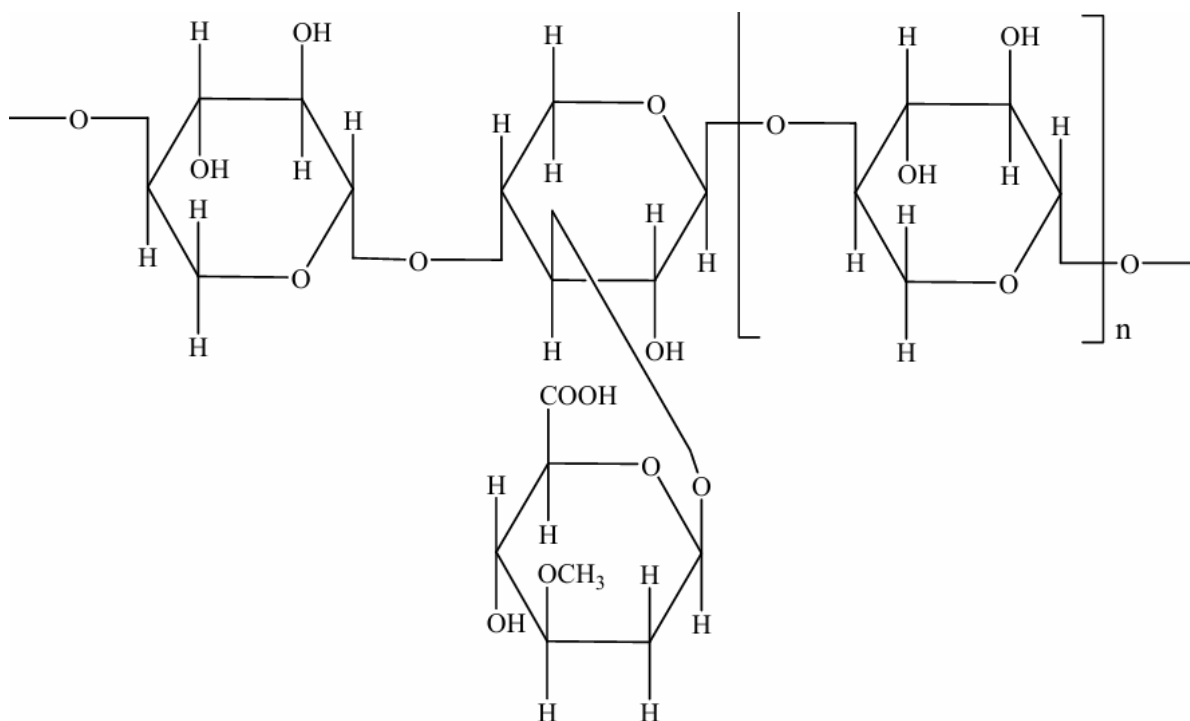


Figura 2.5 Estructura de la hemicelulosa. Fuente: (Shaker & Nawab, n.d.).

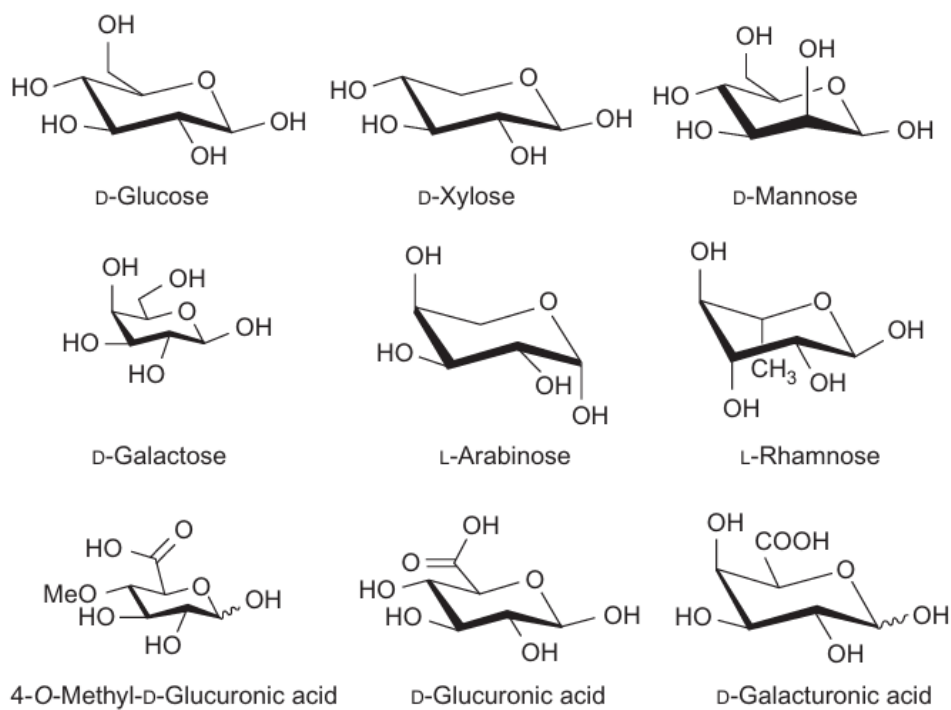


Figura 2.6 Unidades monoméricas en hemicelulosas. Fuente: (Popescu, 2017).

La hemicelulosa exhibe una menor estabilidad térmica en comparación con la celulosa y la lignina, esto se debe a su estructura amorfa y a la mayor presencia de grupos hidroxilo en la pared celular (Figura 2.7). Su función principal radica en actuar como un agente que facilita el acoplamiento entre la superficie de las microfibrillas, que son altamente polares, y la lignina, que es menos polar. Este proceso implica la formación de enlaces de hidrógeno entre la hemicelulosa y las microfibrillas, mientras que entre la hemicelulosa y la lignina se establecen enlaces covalentes. (Popescu, 2017)

2.3.3 Lignina

La estructura de la lignina se muestra en la Figura 2.8; es un polímero formado por unidades de fenilpropano, las cuales son amorfas, altamente complejas y principalmente aromáticas. Suele clasificarse de diversas maneras, pero generalmente se desglosa en componentes estructurales. Estos incluyen los bloques fundamentales de guaiacilo, siringilo y p-hidroxifenilo, presentes en todas las formas de lignina vegetal (Figura 2.9).

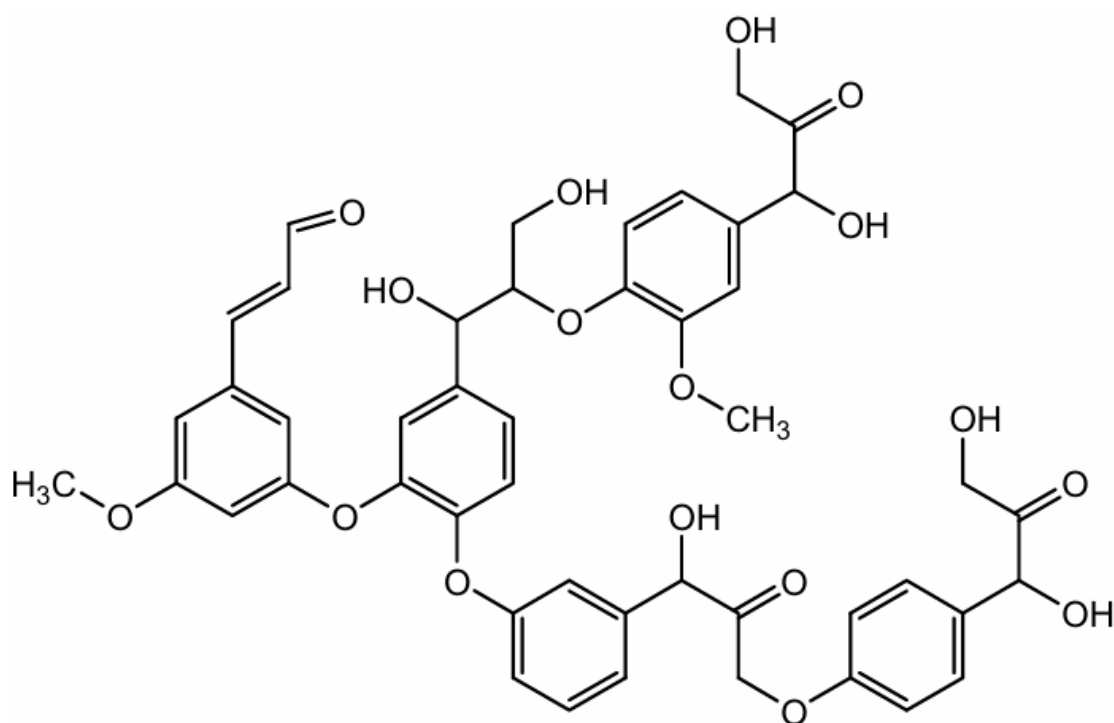


Figura 2.7 Estructura de la lignina. Fuente: (Shaker & Nawab, n.d.).

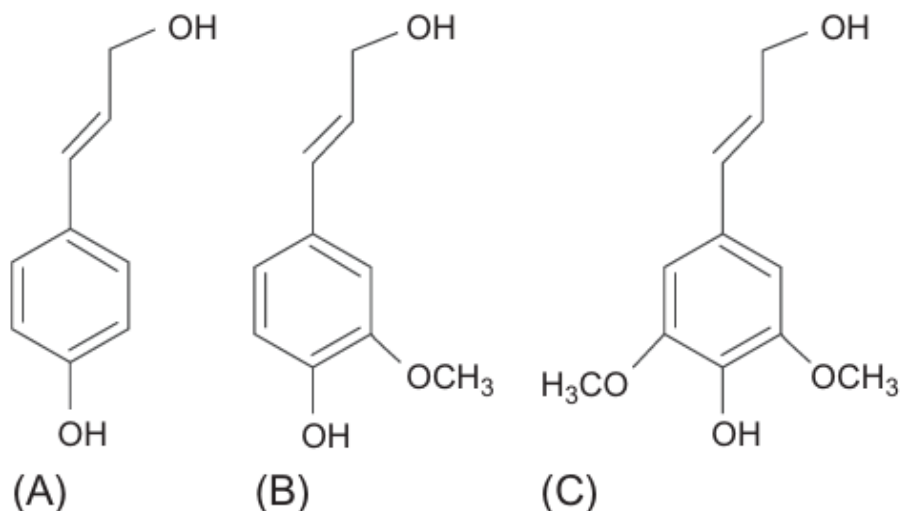


Figura 2.8 Unidades de fenilpropano: (A) *p*-hidroxifenilo, (B) guaiacilo y (C) siringilo. Fuente: (Popescu, 2017).

La función principal de la lignina es mejorar las características hidrofóbicas, lo que impermeabiliza la pared celular y facilita el transporte de minerales a través del tejido vascular. Además, aporta resistencia a la compresión y rigidez a la pared celular, lo que ayuda a la planta a soportar fuerzas de compresión, como la gravedad. La lignina constituye aproximadamente entre el 25% y el 30% del peso total de la planta. Se trata de un polímero tridimensional complejo, con un grado de polimerización de alrededor de 60, y su estructura es amorfa (Shaker & Nawab, n.d.).

2.4 Pistacia Vera.

El pistacho (*Pistacia vera* L. Figura 2.10) es uno de los frutos secos más reconocidos globalmente, y es apreciado tanto por sus beneficios nutricionales como por sus cualidades sensoriales y su relevancia económica. Destaca por su alto contenido de ácidos grasos insaturados y bajo en ácidos grasos saturados. Además, es una fuente rica en proteínas, fibras dietéticas, vitaminas, minerales y antioxidantes. Cada vez se cultiva más y se consume en diversas formas, ya sea crudo, salado o tostado (Kashaninejad & Tabil, 2011).



Figura 2.9 Árbol de pistacia vera. Fuente: (Roc, s. f.)

De acuerdo con Hosseinzai *et al.* (2022), la producción mundial de pistacho llegó a un pico de 1.1 millones de toneladas en 2020. Además, se estima que una parte considerable de los residuos producidos por la industria del pistacho, aproximadamente entre el 35% y el 45%, está compuesta por las cáscaras. Estas cáscaras causan contaminación ambiental y problemas de salud debido a su rápida descomposición y producción de metano. Por lo tanto, debe eliminarse utilizando medios que sean seguros, económicos y ambientalmente amigables (Benli & Bahtiyari, 2024).

La composición de la cáscara de pistache se describe en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Composición de la cáscara de pistache. Generación propia con información tomada de (Čolnik et al., 2024).

Componentes	Hemicelulosa	Celulosa	Lignina
Porcentajes (% peso)	20 – 32	30 – 55	12 – 38

Los residuos derivados del pistacho tienen el potencial de ser utilizados para fabricar diversos productos de mayor valor, como compuestos fitoquímicos, carbón activado, biocombustibles y otros bioproductos, gracias a la cantidad considerable que se produce y a su composición lignocelulósica (Toghiani et al., 2023). Por ejemplo, las cáscaras de pistache se han utilizado para producir carbón activado (Attia et al., 2003); se

ha probado como adsorbente para eliminar metales (Yetilmezsoy & Demirel, 2008), colorante naranja ácido 7 (Kaya A. & Şahin, 2022) y azul de metileno (Moussavi & Khosravi, 2011) que se encuentran en aguas residuales. Por otra parte, se ha probado también como reforzamiento en biopolímeros (PLA (Altun et al., 2022), PBAT) y polímeros sintéticos (referencias).

2.5 Compuestos poliméricos con fibras naturales.

Las fibras naturales han desempeñado un papel crucial en la historia humana, siendo fuentes renovables y amigables con el medio ambiente para la fabricación de productos. En comparación con las fibras sintéticas, ofrecen diversas ventajas, como menor densidad, peso y costo, además de ser biodegradables y tener riesgos mínimos para la salud. Su amplia disponibilidad, facilidad de acceso y bajos requisitos de energía hacen que tengan un gran potencial como alternativas a las fibras sintéticas en la producción de una variedad de productos, desde materiales de construcción hasta textiles (Karimah et al., 2021).

La Tabla 2.5 presenta las fibras naturales más utilizadas a nivel mundial junto con su producción global.

Tabla 2.5 Fibras naturales en el mundo y su producción mundial. Modificado de (Mohammed et al., 2015).

Origen de fibra	Producción global (10 ³ ton)
Bambú	30000
Bagazo de caña de azúcar	75000
Yute	2300
Pistache	1100
Kenaf	970
Linaza	830
Césped	700
Sisal	375
Cáñamo	214
Coco	100
Ramina	100
Abacá	70

En el estudio de las fibras de bambú como refuerzo para compuestos poliméricos, Xiaoya Chen y colaboradores realizaron un trabajo de investigación de compuestos de polipropileno reforzados con fibra de bambú y el estudio de sus propiedades mecánicas. Los autores emplearon polipropileno modificado con anhídrido maleico (MAPP) como agente compatibilizador en el compuesto, buscando mejorar la adhesión entre la fibra de bambú y la matriz de polipropileno. Por otra parte, para la preparación de sus muestras los autores reportaron que todas las materias primas se secaron en un horno a 80 ° C y 180 mm Hg de vacío durante 2 h para expulsar la humedad antes de usarlas para la compresión. Se añadió un 0.5% en peso de compatibilizador al polímero antes de mezclar. Utilizaron fibra de bambú en fracciones de 20%, 30%, 40%, 50% y 60% en peso obteniendo que a 50% en peso de fibra de bambú la resistencia a la tracción de los compuestos MPP/PP se eleva a un valor máximo de 36 MPa y observaron también que el módulo de tracción es de 3.4 GPa para un 50 % en peso de fibra de bambú en el compuesto de polipropileno. Los autores concluyen que el nuevo material es más liviano, resistente al agua y más barato (Chen et al., 1998).

Por otra parte, para el estudio de las fibras de bagazo de caña de azúcar como refuerzo en compuestos poliméricos; Mustafa Al Bakri y colaboradores prepararon compuestos poliméricos de poliestireno con relleno de fibras de bagazo de caña de azúcar para evaluar sus propiedades mecánicas. Para la preparación de las fibras, recolectaron bagazo de caña de azúcar y lo sumergieron en solución de NaCl para tratamiento alcalino durante 3 días. Luego de este período, secaron el bagazo en condiciones ambientales durante varios días. Posteriormente, lo trituraron en una batidora universal y tamizaron con mallas de 425 μ y 300 μ para separar las fibras cortas y granuladas, después secaron todas las fibras en un horno a 50 °C durante 24 h para eliminar la humedad. Además, para la preparación de compuestos, las fibras de bagazo se combinaron con solvente de poliestireno y se secaron en un horno a 70 °C durante 15 min antes de preparar las muestras mediante prensado en caliente. Los autores utilizaron concentraciones de 60%, 70% y 80% en peso de fibras de bagazo de caña de azúcar, concluyendo que la resistencia a la flexión aumenta en bajas concentraciones de fibra de caña de azúcar, y la mezcla de fibra corta y gránulos proporcionó una mayor resistencia a la flexión y compresión en comparación con el material que utilizó exclusivamente fibra corta como matriz. Además, la capacidad de absorción de agua del material de fibra de caña de azúcar osciló entre el 21% y el 35%, mientras que su densidad fue aproximadamente de 0.5 kg/m³ (Al Bakri et al., 2013).

2.6 Compuestos poliméricos con pistacia vera.

Alsaadi y colaboradores realizaron un estudio de un compuesto a base de un poliéster insaturado (Polipol 3401-TAB) con partículas de cáscara de pistache con concentraciones de 0 a 25% en peso, previamente los autores molieron las cáscaras de pistache hasta obtener un tamaño de partícula de 5 μ m. Para la elaboración de los compuestos, primeramente, mezclaron la resina poliéster con las partículas y se mantuvieron en agitación mecánica por 20 min a 1000 rpm. Después se agrega el endurecedor a la mezcla, se mantiene en agitación hasta obtener un gel, finalmente la mezcla se vacía a un molde. Los autores reportaron que las mejores propiedades de resistencia a la tensión, resistencia a la flexión y resistencia al impacto de los compuestos se lograron cuando las concentraciones de las partículas de cáscara de pistache fueron de 10 y 5% en peso. (Alsaadi et al., 2018)

Altun y colaboradores prepararon biocompuestos de PLA con anhídrido maleico (MA) reforzados con cáscara de pistache a concentraciones de 0, 10%, 20% y 30% en peso. Para la preparación de las cáscaras de pistache, los autores realizaron un proceso de lavado con agua de grifo para eliminar impurezas y se pasó a molienda. Después de la molienda el material se tamizó con mallas 300 a 400. Posteriormente, las cáscaras de pistache fueron sometidas a un tratamiento alcalino, en una solución de hidróxido de sodio (5% p/v) durante 3 horas. Luego se lavó con agua destilada para neutralizar.

Para la elaboración de los biocompuestos, el PLA se fundió usando un mezclador interno contrarrotativo durante 1 a 2 min; después se añadió una combinación de MA y peróxido de dicumilo (DCP) al PLA ya

fundido y se hizo reaccionar durante 5 min, finalmente, introdujeron cáscaras de pistache (tratadas y no tratadas) al mezclador interno.

Los autores reportaron que al agregar cáscara de pistache con un 30% en peso se logra el máximo reforzamiento; pero por encima al 30% las propiedades mecánicas se ven comprometidas y también la preparación del compuesto. (Altun et al., 2022)

Por otra parte, Kadhim y colaboradores realizaron un estudio para evaluar el efecto del polvo de cáscara de pistache sobre en algunas propiedades (resistencia a la tracción, porcentaje de alargamiento, módulo de Young) de una resina acrílica PMMA que es empleado usualmente en la elaboración de dentaduras postizas. Realizaron pruebas con fracciones de peso de 3, 6, 9 y 12% y tamaños de partícula de 53 μ m, 106 μ m, 150 μ m y 212 μ m.

Para la elaboración de sus compuestos, los autores modificaron previamente el polvo de cáscara de pistache mediante un tratamiento químico alcalino que consistió en 5% (p/v) de NaOH en agua destilada a temperatura ambiente. Los autores reportaron que el tamaño de partícula más fino (53 μ m) mejora el módulo de elasticidad. Los autores argumentaron que este incremento en esta propiedad se debe a que las partículas finas impiden el deslizamiento de las cadenas de la matriz polimérica. El porcentaje en peso óptimo fue de 12% con un tamaño de partícula de 53 μ m ya que se aumenta favorablemente el módulo de Young (Kadhim et al., 2020).

2.7 Compuestos a base de almidón termoplástico (ATP) con lignocelulosa.

El almidón termoplástico es un biopolímero que se ha utilizado en diversos trabajos a partir del año 1982. Debido a que el ATP tiene una baja resistencia mecánica, alta absorción de humedad, etc. Para mejorar sus propiedades físico-mecánicas se han utilizado partículas orgánicas o inorgánicas (Diyana et al., 2021b). Entre las partículas orgánicas las más comunes son residuos lignocelulósicos como fibras de coco, agave (García Hernández et al., 2021a) (Solís Rosales et al., 2022), caña, kenaf. Por otra parte, para las partículas inorgánicas se encuentran, nanoarcillas, carbonato de calcio (Wang et al., 2024), grafeno (Ajaj et al., 2024), etc.

Para lograr un mejor reforzamiento en el almidón termoplástico, se ha demostrado que las fibras lignocelulósicas mejoran de manera significativa las propiedades mecánicas del ATP. Por ejemplo, Bijan Nasri y colaboradores realizaron un estudio acerca de la preparación y caracterización de compuestos de almidón termoplástico reforzados con nanofibras de celulosa, utilizando almidón de papa y paja de arroz en concentraciones de 0 a 15% en peso (0%, 5%, 10% y 15%). Para la preparación de sus muestras, las fibras de paja de arroz se modificaron químicamente para eliminar lignina, hemicelulosa y extractos de la paja de arroz remojando las fibras en una solución de NaOH al 17.5% en peso durante 2 h. Posteriormente lavaron las fibras con abundante agua destilada hasta que el pH de la solución en la que las fibras estaban contenidas se volvió neutro, luego las hidrolizaron y blanquearon para después someterlas a un tratamiento de ultrasonido a 400 w y 20 Hz por 30 min. Para la preparación de compuestos, los autores utilizaron 90% en peso de agua desionizada, 7% en peso de almidón y nanofibras y 3% en peso de glicerol. El almidón y las nanofibras las fijaron en proporciones de peso de 100:0, 95:5, 90:10 y 85:15. Posteriormente evaluaron las propiedades mecánicas de las muestras y encontraron que al aumentar el contenido de nanofibras de 0 a 15 % en peso (almidón/nanofibras), el módulo de Young se incrementó significativamente de 36 $\pm$ 3.4 a 160 $\pm$ 16.4 MPa y la resistencia a la cedencia se incrementó de 3.1 $\pm$ 0.22 a 5.01 $\pm$ 0.67 MPa. Este incremento tanto en el módulo de Young como en la resistencia a la cedencia los autores la explicaron que se generó como resultado de la buena adhesión interfacial entre el ATP y la nanocelulosa (Nasri-Nasrabadi et al., 2014).

Por otra parte, Ortuño López *et. al.* (2023) realizaron compuestos de almidón de maíz termoplástico y fibras de *Hibiscus sabdariffa* (HS) en concentraciones de 0 a 10% en peso (0%, 2%, 4%, 6%, 8% y 10%). Las fibras previamente fueron hervidas, secadas, trituradas en un molino electrónico y tamizadas en malla 60. Para la preparación de sus compuestos utilizaron 2 gr de almidón de maíz, 50 mL de agua destilada y 1 mL de glicerol. Posteriormente, calentaron la solución a 90°C durante 10 min con agitación mecánica y la vertieron en moldes de silicón y la secaron durante 48 h a 30°C. Los autores reportaron que la incorporación de fibras HS reduce el módulo de Young, la resistencia a la tracción y la deformación a la rotura; también encontraron que en el módulo de almacenamiento del compuesto al 4% de refuerzo fue de 1139 MPa a 50 °C; mientras que el de la matriz de almidón fue de 854 MPa a 50 °C. (Ortuño-López et al., 2023)

En la Tabla 2.6, se presentan de manera resumida algunos de los trabajos sobre los compuestos de ATP reforzados con residuos lignocelulósicos. De manera general se ha observado que la adición de las fibras naturales o compuestos lignocelulósicos promueven una mejora en las propiedades mecánicas. Este mismo efecto se ha observado cuando a las fibras se les hace una modificación química superficial.

Tabla 2.6 Artículos relevantes con respecto al ATP reforzado con residuos lignocelulósicos. Creación propia Z. Romero, 2024.

Nombre del artículo	Tipo de almidón	Contenido de plastificante (%)	Fibra natural utilizada	Propiedades mejoradas	Referencia
Análisis comparativo de biocompuestos termoplásticos de almidón de yuca reforzados con fibra de celulosa de cáscara de arroz y partículas de caolín utilizando la técnica de fundición en solución.	Yuca	Glicerol 7.5	Cáscara de arroz/partículas de caolín.	• Límite elástico (aumento de 60% con partículas de caolín y 125% cáscara de arroz) • Resistencia a la tracción (aumento de 225% y 337.5% respectivamente) • Módulo de Young (aumento de 673% y 433% respectivamente)	(Agyei-Tuffour et al., 2021)
Refuerzo de la película de almidón con polisacáridos de conchas de <i>Castanea sativa</i> : Formulación y caracterización optimizadas	Papa	40, 50 y 60	Castaña	• Resistencia a la tracción (aumento de 1.26 ± 0.08 MPa a 5.55 ± 0.67 MPa) • Módulo de Young (aumento de 5.97 ± 0.58 MPa a 13.88 ± 0.66 MPa)	(Amaral et al., 2022)

Efecto de la fibra de kenaf como relleno de refuerzo en películas biocompuestas a base de almidón de maíz	Maíz	Sorbitol 30	Kenaf	- Resistencia a la tracción 17.74 MPa - Módulo de Young 1324.74 MPa - Alargamiento de rotura 48.79 %	(Hazrol, Sapuan, Zainudin, et al., 2022)
Películas biocompuestas de almidón termoplástico reforzadas con nanocelulosa de <i>agave tequilana</i> Weber var. Bagazo Azul	Maíz	Glicerol 30	Agave tequilana	- Resistencia a la tracción (de 2 MPa a 10.06 MPa) - Módulo de Young (de 22.6 MPa a 27.7 MPa)	(Lomeli-Ramírez et al., 2023)
Procesamiento y caracterización de compuestos termoplásticos de almidón de yuca reforzados con fibra de hoja de plátano	Yuca	Glicerol 27	Hoja de plátano	- Resistencia a la tracción (3MPa a 18 MPa) - Módulo de flexión (500 MPa a 2500 MPa)	(Jumaidin et al., 2021)
Morfología y propiedades seleccionadas de biocompuestos híbridos de almidón de maíz reforzados con fibra de kenaf y cáscara de maíz	Maíz	Sorbitol 30	Kenaf / cáscara de maíz	- Resistencia a la tracción (17 MPa a 23.2 MPa) - Módulo de Young (1325 MPa a 1486 MPa)	(Hazrol, Sapuan, Ilyas, et al., 2022)

3 METODOLOGÍA

En este capítulo se detallan los materiales utilizados durante la fase experimental del proyecto junto con los métodos empleados para la producción del polvo de cáscara de pistache (PS), y los tratamientos de modificación: físico (UPS), químico (APS) y dual (AUPS). Además, se describe el proceso para crear los biocompuestos de almidón termoplástico (SF) mezclado con PS, APS, UPS y AUPS (SF-PS, SF-APS, SF-UPS, SF-AUPS). Por último, se explican las técnicas de análisis empleadas para determinar las propiedades del polvo nativo y modificado; así como también al de los biocompuestos elaborados. Todo lo anterior con el propósito de cumplir los objetivos establecidos en las generalidades.

3.1 Materiales.

En esta sección se mencionan los materiales utilizados para la ejecución del proyecto, los proveedores y cantidades empleadas.

3.1.1 Almidón.

El almidón de maíz fue adquirido en Ingredion (Zapopan, México)

3.1.2 Cáscaras de pistache.

Se compraron pistaches en un supermercado local (Saltillo, México)

3.1.3 Hidróxido de sodio (NaOH).

Hidróxido de sodio 97% se adquirió en Sigma – Aldrich Saint Louis, MO, EE.UU.

3.1.4 Glicerol.

Glicerol G7757 Se adquirió en Sigma – Aldrich Saint Louis, MO, EE.UU.

Para todas las pruebas se utilizó, agua destilada de grado analítico.

3.2 Lavado de las cáscaras de pistache.

Para el lavado de las cáscaras de pistache se utilizó agua destilada. Las cáscaras de pistache se colocaron en un refractario de vidrio grande, quitando los residuos de piel del pistache para obtener solamente la cáscara dura del pistache. Una vez retirados los residuos no deseados de la cáscara, se le agrega agua destilada hasta cubrir por completo todas las cáscaras de pistache. Para el primer lavado, se dejaron las cáscaras en inmersión por 48 horas. En el segundo lavado se dejaron las cáscaras en inmersión durante 24 horas y para el tercer y último lavado las cáscaras pasaron 24 horas en inmersión nuevamente y se retiraron los residuos restantes de piel de pistache más grandes.

Las cáscaras de pistache después de ser lavadas pasan a un proceso de secado para el cual se realizó un enjuague de las cáscaras con agua destilada en un tamiz para separar la cáscara dura de pistache de cualquier materia suspendida resultante de los lavados. Una vez separadas las cáscaras de pistache, se colocaron en una charola de aluminio para introducirlas a una estufa a 95°C por 24 horas a temperatura constante.

3.3 Obtención de la harina de cáscara de pistache.

Para obtener la harina, las cáscaras previamente lavadas se sometieron a un proceso de molienda utilizando una licuadora Oster, para ello se agregaron 35 mL a la licuadora y se molió durante 3 minutos. Posteriormente se sacó el material de la licuadora y fue tamizado con una malla No. 30 y 600 μm , finalmente se obtuvieron 69.008 g de harina.

3.4 Tratamiento NaOH y ultrasonido.

Se prepararon 4 muestras cada una de 10 g en peso, PS control, APS para tratamiento alcalino, UPS para ultrasonido y AUPS para tratamiento alcalino y ultrasonido. Para el tratamiento alcalino se preparó NaOH 1% (10 gr NaOH/1L H₂O destilada), APS y AUPS se dejaron en inmersión por 24 h, después se realizaron 3 lavados a cada una hasta obtener un pH 7. El tratamiento de ultrasonido se realizó con una amplitud del 60%, la punta sumergida a 3 cm con un tiempo de duración de 30 min sin pulsaciones con agitación constante.

3.5 Elaboración de películas.

Para la elaboración de la película control de almidón se utilizó una proporción de 100 mL de agua destilada, 4 gr de almidón de maíz, 1.2 gr de glicerol. Posteriormente a esta mezcla se adicionaron 1.2 gr de cada muestra de cáscara de pistache nativa (PS) y modificada (APS, UPS, AUPS). Se utilizó una parrilla con agitación, el agua destilada se calentó y posteriormente se agregó lentamente el almidón de maíz seguido del glicerol, se dejó calentar la solución hasta 50°C y llegando a esa temperatura se agregó la muestra de cáscara de pistache nativa. La mezcla se dejó calentar hasta 85°C y se mantuvo constante durante 5 min hasta que gelatinizó y se vertió en una placa y se dejó secar a condiciones ambientales durante 24 h. Se repitió el mismo proceso para cada muestra de cáscara de pistache modificada (APS, UPS, AUPS).

3.6 Métodos.

La composición química de las muestras se evaluó mediante un espectrómetro de fotoelectrones de rayos X, equipo VersaProbe II de la empresa PHI, con una bomba de vacío de 2×10^{-8} mTorr. Se utilizó una fuente de rayos X monocromática con ánodo de aluminio y una energía de radiación de 1486.6 eV. Los espectros globales (survey) se obtuvieron con una energía de paso de 117.4 eV; la región de análisis fue de 1400 - 0 (eV) en energía de enlace.

Los espectros de alta resolución de la señal C 1s y O 1s para cada muestra se obtuvieron con una energía de paso de 11.75 eV. Estos espectros fueron deconvolucionados mediante ajuste de curvas gaussianas, dejando su posición y área sin restricción; sin embargo, el valor de FWHM se mantuvo fijo en cada una de las curvas ajustadas.

3.6.1 FTIR.

Se realizaron análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) utilizando un espectrómetro infrarrojo Nicolet Magna-550. Se empleó la técnica de reflectancia atenuada (ATR-FTIR) en un rango de longitud de onda de 4000 a 500 cm^{-1} . Con el equipo del ATR de 120 barridos y una resolución de 16 cm^{-1} .

3.6.2 TGA.

La degradación térmica se analizó en un TGA Q500 (TA, Instruments, EEUU), el rango de temperatura de 30 a 600°C y con una velocidad de calentamiento 10 °C/min en una atmósfera de nitrógeno. Después de los 600°C se utilizó una atmósfera de oxígeno para favorecer la combustión completa de los compuestos orgánicos. Para calcular la pérdida de peso y su derivada, se utilizó el software del equipo.

3.6.3 DSC.

El análisis térmico de barrido diferencial se realizó en un DSC 2500 (TA, Instruments, EEUU), cada muestra de 7 mg se colocó en un recipiente de aluminio, posteriormente se sometió a calentamiento de 25 a 220°C, la velocidad de calentamiento 10 °C/min en una atmósfera de nitrógeno.

3.6.4 DRX.

El análisis difracción de rayos X de las fibras se realizaron en un difractómetro (D8 Advance ECO, Bruker, EE. UU.) con irradiación $\text{CuK}\alpha$ a $\lambda=1.5418 \text{ \AA}$ conectado a una fuente de alimentación de 40 kV y 25 mA. Los patrones de difracción se recolectaron en un rango angular de 5 a 50 (2θ), con un tamaño de paso de 0.05° en un tiempo de conteo por paso angular de 15 s y un tiempo total de 45 minutos por muestra.

Para el análisis de las películas se utilizó un difractómetro (Dobel, D500, SIEME), con un rango de análisis de 5 a 45 (2θ), tamaño de paso de 0.06 y tiempo de conteo por paso angular de 3 segundos, con un tiempo total de 45 minutos por muestra.

3.6.5 SEM

Las imágenes electrónicas de barrido fueron recolectadas por medio de un microscopio (JEOL JCM6000) con potencia de 15 kV, las muestras se fijaron con una cinta doble cara de cobre, posteriormente se recubrieron con oro-paladio. Las imágenes de las fibras se obtuvieron con un aumento de x2000.

3.6.6 DMA

El comportamiento dinámico de las muestras se evaluó utilizando un analizador mecánico dinámico Q800 (TA Instruments). Se empleó una configuración de tensión para todas las muestras. Las mediciones de análisis mecánico dinámico (DMA) se realizaron a una frecuencia fija de 1 Hz con una amplitud de oscilación de 20 μm . Las mediciones se realizaron de 30°C a 180 °C y una velocidad de calentamiento de 5 C/min. Las dimensiones de la muestra fueron de 5 x 25 mm².

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos a través de las técnicas de caracterización mencionadas previamente. Se llevó a cabo la caracterización de PS, APS, UPS y AUPS, con el fin de conocer su composición química y propiedades térmicas, para identificar los cambios entre ellas. Además, se realizó la caracterización química y térmica de los biopolímeros SF, SF-PS, SF-APS, SF-UPS, SF-AUPS, observando a detalle las diferencias entre las muestras. También se llevó a cabo un análisis dinámico mecánico para evaluar las propiedades físicas de los biocompuestos obtenidos, con vistas a futuras aplicaciones.

4.1 Caracterización de las fibras de cáscara de pistache.

A continuación, se presenta el análisis de resultados obtenidos en cada una de las técnicas de caracterización aplicadas las cuales se utilizaron para analizar las propiedades físicas, químicas y funcionales de las fibras de cáscara de pistache.

4.1.1 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

El análisis FTIR se llevó a cabo para corroborar la alteración de los grupos funcionales de la cáscara de pistache después de los tratamientos de modificación realizados (alcalino y ultrasonido). En la Figura 4.1 se muestran los espectros IR de la muestra de cáscara de pistache nativa (PS), cáscara de pistache tratada por un método químico alcalino NaOH 1% (APS), cáscara de pistache tratada con ultrasonido (UPS) y dual (AUPS). El espectro IR de PS presenta las siguientes bandas. La banda a 3348 cm^{-1} se atribuye a grupos hidroxilos OH presentes en los compuestos lignocelulósicos (hemicelulosa, celulosa y lignina). De acuerdo con la literatura, las bandas 2934 cm^{-1} y 1731 cm^{-1} se asocian con grupos OH y estiramiento del grupo C=O pertenecientes a la hemicelulosa. Los grupos OH de la banda 2934 cm^{-1} también se relacionan con la celulosa, la banda 896 cm^{-1} se atribuye al enlace glucosídico en la celulosa. En la banda 1594 cm^{-1} se producen vibraciones C=C pertenecientes a la lignina, las bandas a 1318 y 1241 cm^{-1} se les relaciona con el estiramiento de grupos funcionales C-O-H y C-O respectivamente los cuales se asocian a la lignina (da Silva et al., 2018).

Después de los tratamientos, para la muestra APS y AUPS no se observa la banda 1731 cm^{-1} correspondiente al grupo funcional C=O asociado con la hemicelulosa. Así mismo, la banda a 1241 cm^{-1} del grupo funcional C-O asociado a la lignina fue removida. Este comportamiento sugiere que el contacto entre PS y la solución alcalina promovió la adsorción de especies de NaOH en la periferia de la superficie de la cáscara de pistacho, lo que debilitó la red de enlaces de hidrógeno entre sus cadenas. De este modo, el tratamiento logró la eliminación parcial de sus componentes de hemicelulosa y lignina. Por otra parte, la banda a 896 cm^{-1} atribuida al enlace glucosídico en la celulosa se nota más agudo para APS y AUPS, indicando que hay un aumento en la celulosa presente en APS y AUPS. Sin embargo, en el tratamiento de ultrasonido (UPS) no se observaron cambios o alteraciones en las bandas de los grupos funcionales con respecto al control, esto indica que las ondas ultrasónicas no tienen influencia sobre los componentes lignocelulósicos, esto debido a que es un tratamiento físico superficial. (Tavares et al., 2020)

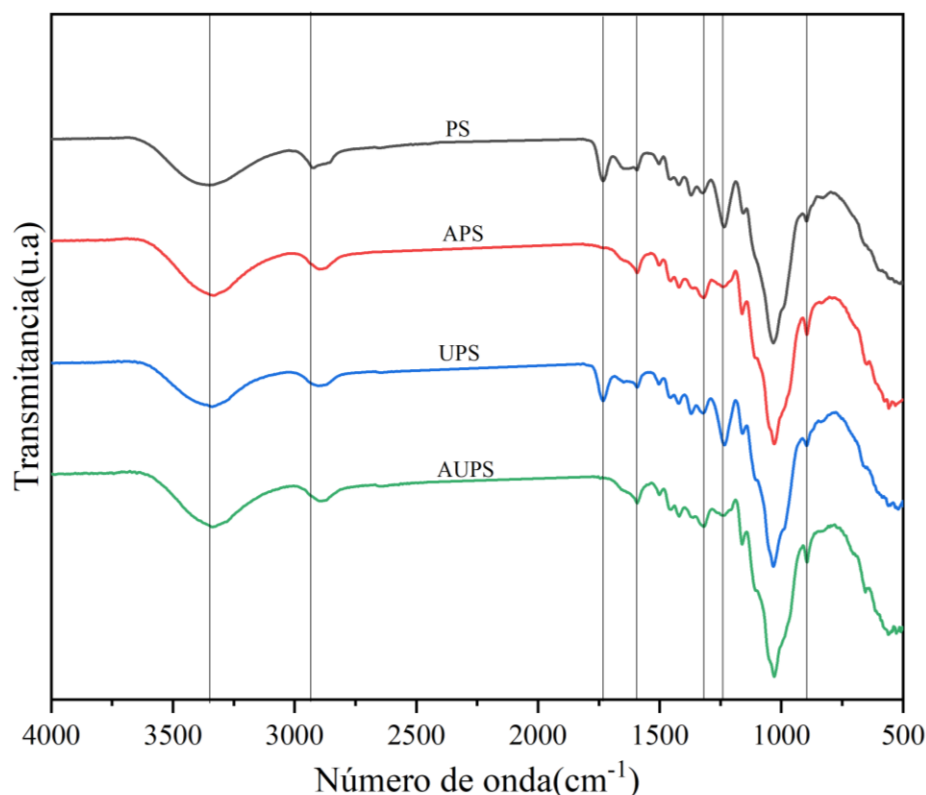


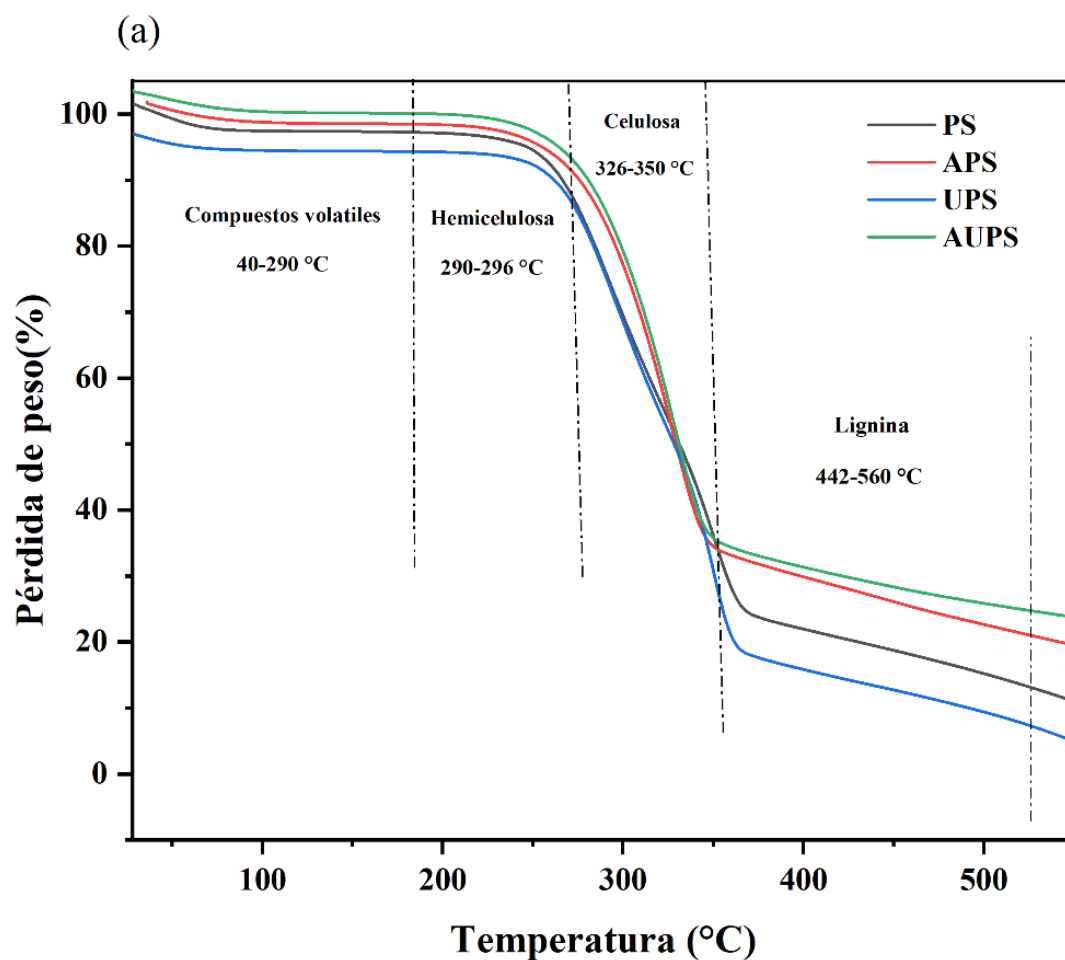
Figura 4.1 Espectro FTIR de fibras de cáscara de pistache sin tratar y tratadas con método alcalino y ultrasonido. Creación propia Z. Romero, 2024.

4.1.2 Análisis termogravimétrico (TGA).

En la Figura 4.2 se muestra el análisis TGA realizado a las muestras de cáscara de pistache nativas (PS) y modificadas (APS, UPS, AUPS). Las composiciones de las muestras analizadas se pueden observar en la Tabla 4.1.

En la Figura 4.2 para la muestra PS se puede observar una primera pérdida de peso a 41.23 °C relacionada al contenido de humedad de la muestra. Así mismo, se observan pérdidas de peso correspondientes a la hemicelulosa (292.55°C), celulosa (351.26°C) y lignina (556.03°C). Después del tratamiento alcalino (APS) la señal asociada a la hemicelulosa desapareció, lo que sugiere el aumento de la fracción de celulosa (68.47 %) en comparación con PS (35.20 %) (da Silva et al., 2018) . Esta tendencia indica que el tratamiento alcalino promovió el hinchamiento del PS, modificando su porosidad. Así, la solución alcalina alcanza los enlaces de hidrógeno de las cáscaras, rompiendo y eliminando la red de hemicelulosa que rodea su superficie. Este efecto fue más notorio en AUPS ya que la cavitación transfiere por turbulencia (micro streaming) la solución alcalina hacia las regiones amorfas de la hemicelulosa, debilitando en mayor medida las interacciones entre las cadenas que conforman la fracción de hemicelulosa. Además, el tratamiento alcanza sitios donde se encuentra la lignina; con ello su contenido disminuye del 12 al 8%. Para la muestra UPS no se muestra la alteración de ninguna curva, se sigue conservando la hemicelulosa, celulosa y lignina en fracciones similares a PS. (García Hernández et al., 2021b).

Figura 4.2 (a) termograma de la pérdida de peso de muestras de cáscara de pistache nativa y modificadas, (b) derivada para pérdida de masa de cáscaras de pistache nativa y modificadas. Creación propia Z. Romero, 2024.



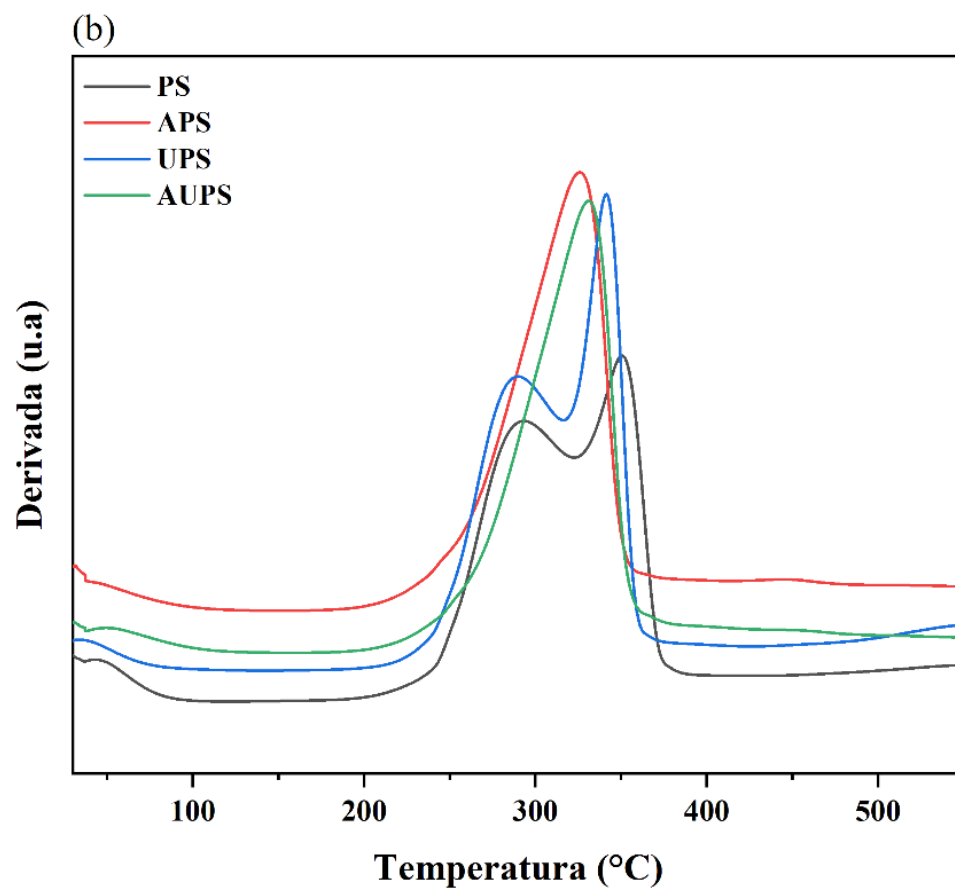


Tabla 4.1 Composición de las fibras de cáscara de pistache PS, APS, UPS y AUPS. Creación propia Z. Romero, 2024.

MUESTRA	COMPONENTE (%)				
	HUMEDAD	HEMICELULOSA	CELULOSA	LIGNINA	RESIDUO
PS	4.125	42.26	35.20	12.55	6.05
APS	3.145	---	68.47	12.04	16.34
UPS	3.845	41.75	39.13	13.10	2.17
AUPS	3.420	---	68.96	8.60	19.01

4.1.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM).

Se analizó por SEM la morfología de las cáscaras de pistache nativas y modificada con un método de modificación químico (NaOH 1%) y físico (ultrasonido). En la Figura 4.3 se muestran las imágenes correspondientes a las muestras con un aumento de 1500X. La muestra de cáscara de pistache nativa (PS - Figura 4.3 (a)) presenta rugosidad en su superficie con una morfología homogénea y algunas grietas. En el tratamiento alcalino demostrado por la Figura 4.3 (b) se promovió una superficie más rugosa con mayor porosidad lo cual sugiere que se removieron partes externas de la fibra, como lo puede ser la hemicelulosa. Después del tratamiento con ultrasonido, como se observa en la Figura 4.3 (c), hubo formación de poros en la superficie y se suavizaron las rugosidades debido a que durante el tratamiento se generan potentes ondas de choque y el impacto en la superficie de la fibra provoca el desprendimiento de la superficie y descomposición de impurezas (Tavares et al., 2020). La Figura 4.3 (d) muestra los cambios propiciados por el tratamiento dual (alcalino/ultrasonido), se observa una mayor porosidad y homogeneización de la superficie, esto puede ser atribuido a las ondas ultrasónicas las cuales promueven la formación de poros dejando así que el tratamiento alcalino penetre más profundo en la cáscara de pistache, atacando compuestos internos como la lignina.

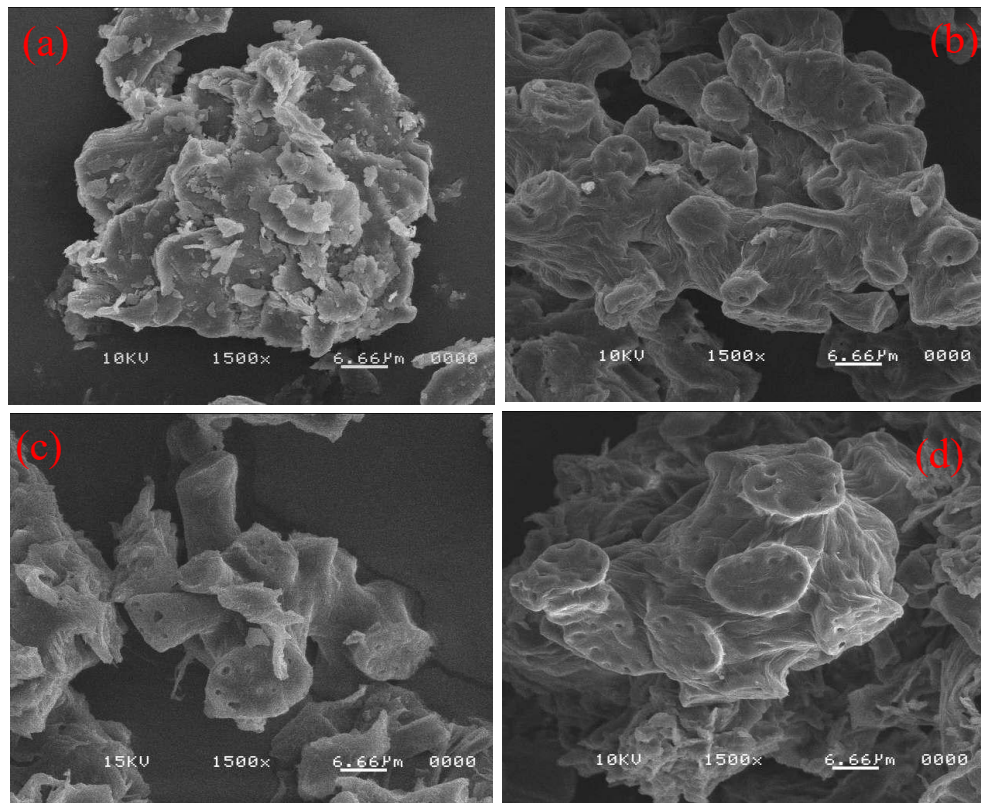


Figura 4.3 SEM cáscara de pistache para muestras nativa y modificadas, (a) PS (b) APS (c) UPS (d) AUPS. Creación propia Z. Romero, 2024.

4.1.4 Calorimetría diferencial de barrido (DSC).

El comportamiento térmico y la energía requerida para cada transición del polvo de cáscaras de pistache nativo y modificado se monitoreó mediante análisis DSC. En la Figura 4.4 se muestran los termogramas del polvo de cáscara de pistache nativo y modificados. La muestra PS presenta un pico de transición endotérmico en 95.91 °C ($\Delta H = 122.32$ J/g) que corresponde a la pérdida de agua (humedad). Así mismo, PS presenta dos picos exotérmicos dentro del rango de temperatura de 250 °C a 387 °C. De acuerdo con la literatura, el rango de descomposición de la hemicelulosa está entre 210 y 325 °C, de celulosa entre 310 y 400 °C y de lignina entre 160 °C y 900 °C (Yang et al., 2007). El primer pico exotérmico, para PS, se encuentra en 288.43 °C ($\Delta H = 72.94$ J/g) y corresponde a la degradación de la hemicelulosa. El segundo pico exotérmico aparece en 366.11 °C ($\Delta H = 3.98$ J/g) y se atribuye a la degradación de la celulosa/lignina (M. Kaya et al., 2018).

Las muestras APS, UPS y AUPS presentan un aumento con respecto a PS en la temperatura del pico endotérmico de 116.92 °C, 97.94 °C y 96.70 respectivamente. Por otra parte, para el primer pico exotérmico atribuido a la degradación de hemicelulosa las muestras UPS y AUPS muestran un aumento significativo en la temperatura de 300.75 °C ($\Delta H = 81.28$ J/g) y 296.28 °C ($\Delta H = 18.27$ J/g) respectivamente, mientras que APS mostró una disminución de temperatura a 284.82 °C ($\Delta H = 22.48$ J/g). Este comportamiento se puede describir como el aumento de la estabilidad térmica que aporta el tratamiento dual y de ultrasonido a la fibra de cáscara de pistache por el aumento en la fracción de celulosa demostrado en el análisis TGA. Además, el comportamiento de la muestra APS se puede relacionar con la remoción de la hemicelulosa y el IC alto (48.39%) que presenta esta muestra en la técnica DRX, lo cual provoca que no se muestren cambios en esta transición exotérmica.

Para el segundo pico exotérmico asociado a la degradación de la celulosa/lignina, las muestras APS y AUPS muestran una disminución de la temperatura con respecto a PS de 349.55 °C ($\Delta H = 14.04$ J/g) y 349.09 °C ($\Delta H = 10.77$ J/g), respectivamente, mientras que para UPS se observa un aumento en esta temperatura de 371.12 °C ($\Delta H = 6.95$ J/g) determinando así que el tratamiento de ultrasonido da mayor estabilidad térmica a la fibra de cáscara de pistache. (Balasundar et al., 2019)

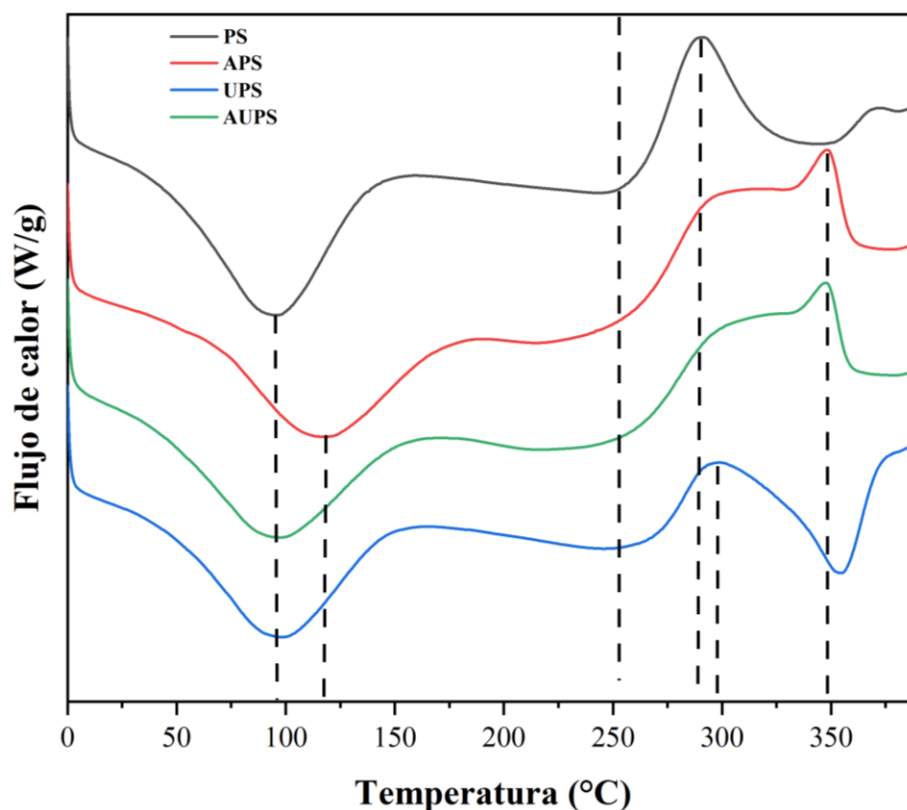


Figura 4.4 Termogramas DSC de polvo de cáscara de pistache nativo y modificado. Creación propia Z. Romero, 2024.

4.1.5 Difracción de rayos X (DRX).

Se inspeccionó mediante DRX los efectos de los tratamientos realizados al polvo de cáscara de pistache. La Figura 4.5 muestra el patrón de difracción de rayos X de las muestras PS, APS, UPS y AUPS las cuales formaron picos en $2\theta = 17.44^\circ$ y $2\theta = 21.74^\circ$, que son característicos de las regiones amorfas y cristalinas de la celulosa tipo I (Çelik et al., 2021). No se observaron cambios en el patrón de rayos X de las muestras APS, UPS y AUPS con respecto a PS, sin embargo, hubo un aumento en la intensidad de los picos de las muestras modificadas con respecto a PS, lo cual se puede atribuir a un cambio en su índice de cristalinidad.

El IC para PS es de 31.41%, las muestras modificadas muestran un aumento en su IC con respecto a PS como se puede observar en la Tabla 4.2. El aumento del IC para APS indica que la solución alcalina se embebió dentro de los polisacáridos que componen la hemicelulosa, promoviendo la disrupción de sus cadenas de orden inferior, promoviendo así el crecimiento de regiones cristalinas de las estructuras de la cáscara de pistacho. La muestra UPS muestra un ligero aumento del IC debido a que el tratamiento de ultrasonido por sí sólo no demostró grandes cambios a nivel superficial. Aunque los valores de IC fueron similares tanto para APS como para APSU, el fenómeno de cavitación por ultrasonido podría promover que la solución alcalina migre a las zonas de interfaz entre la lignina y la hemicelulosa, alterando estos sitios como lo indicaron los resultados de TGA y FTIR.

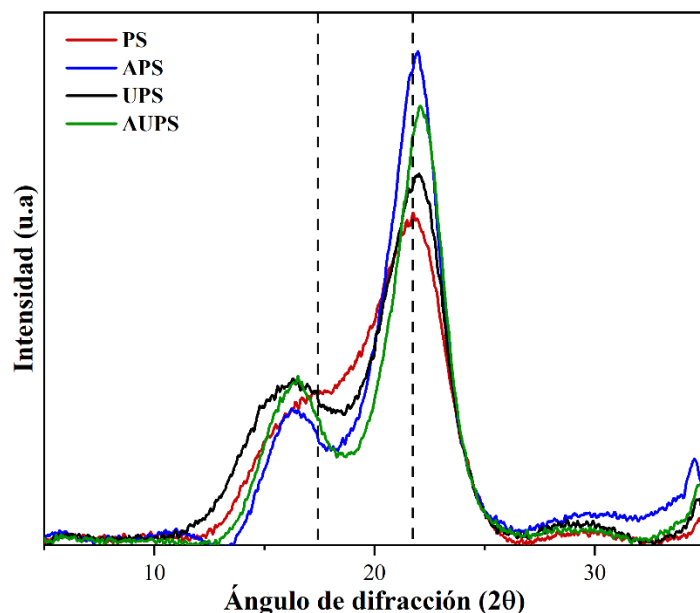


Tabla 4.2 Cristalinidad del polvo de cáscara de pistache nativo y modificados. Creación propia Z. Romero, 2024.

Muestra	IC (%)
PS	31.41
APS	48.39
UPS	36.65
AUPS	46.91

Figura 4.5 Difractograma de rayos X de polvo de cáscara de pistache nativo y modificados. Creación propia Z. Romero, 2024.

4.2 Caracterización de películas.

A continuación, se presenta el análisis de resultados obtenidos en cada una de las técnicas de caracterización aplicadas las cuales se utilizaron para analizar las propiedades físicas, químicas y funcionales de las películas.

4.2.1 FTIR

Los espectros FTIR de las películas de almidón (SF) y las películas de almidón con polvos de cáscara de pistache nativo (PS) y modificados (APS, UPS, AUPS) se muestran en la Figura 4.6. La película SF mostró bandas en 761 cm^{-1} y 937 cm^{-1} que son atribuidas a las vibraciones de estiramiento del anillo de piranosa de la glucosa, en 1152 cm^{-1} asociada con la vibración de estiramiento en enlaces $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ de glucosa (De Albuquerque et al., 2014). También se encuentra la banda 1635 cm^{-1} la cual corresponde al agua fuertemente unida presente en el almidón, por otra parte, las bandas 2925 cm^{-1} y 3317 cm^{-1} se relacionan con la vibración de $\text{C}-\text{H}$ relacionado con el grupo OH (Chi et al., 2007). Se observan bandas similares para las películas que contienen polvo de cáscara de pistache nativo y modificado, lo cual indica que la adhesión de los polvos no agregó o alteró algún grupo funcional del almidón.

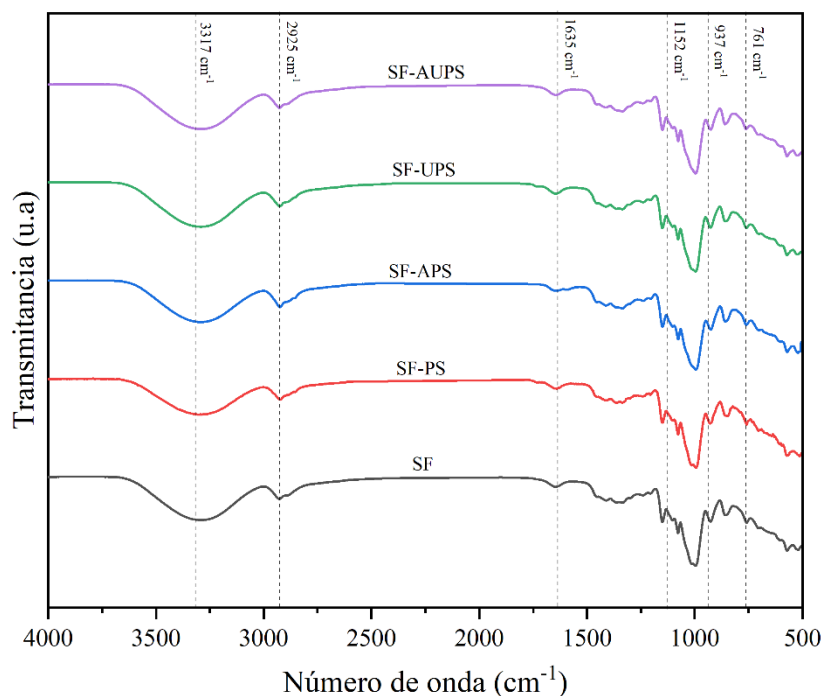


Figura 4.6 Análisis de FTIR para películas de almidón con polvo cáscara de pistache nativo y modificado. Creación propia Z. Romero, 2024.

4.2.2 DRX

En la Figura 4.7 se presenta el patrón de difracción de rayos X de las películas de almidón y de las que contienen cáscara de pistache no modificada y modificada. SF mostró picos de difracción característicos de patrón tipo A correspondiente a cereales en 2θ de 15° , 17° , 19.76° y 22.06° . Los picos en 2θ a 15° y 19.76° se atribuyen a cristales formados por la complejación de amilosa y glicerol (Mendes et al., 2016). Por otra parte, las películas elaboradas con almidón y cáscara de pistache mostraron un patrón similar y mostraron picos adicionales a 25° y 30° que se atribuyen a las regiones cristalinas de la celulosa tipo I (Çelik et al., 2021). No obstante, se identificaron diferentes intensidades en algunos picos para todas las películas, lo que resultó en una variación de los valores del índice de cristalinidad los cuales se muestran en la Tabla 4.3; el mayor incremento en el IC (de un 58.39%) se identificó para SF-APS ya que durante el tratamiento alcalino se removieron componentes no celulósicos en la región amorfa de la cáscara de pistache, lo que dio como resultado una mayor fracción de celulosa y mayor cristalinidad, esto resulta en interacciones más fuertes entre las partículas de almidón y celulosa contenida en la cáscara. Sin embargo, SF-UPS muestra un comportamiento opuesto ya que su IC (52.49%) no aumentó significativamente con respecto a SF lo que indica que la muestra UPS incorporada a la película de almidón tenía menos estructuras cristalinas ya que el tratamiento de ultrasonido no removió componentes amorfos de las fibras y esto limita las interacciones de la muestra con la película de almidón no permitiendo formación de cristales entre los componentes.

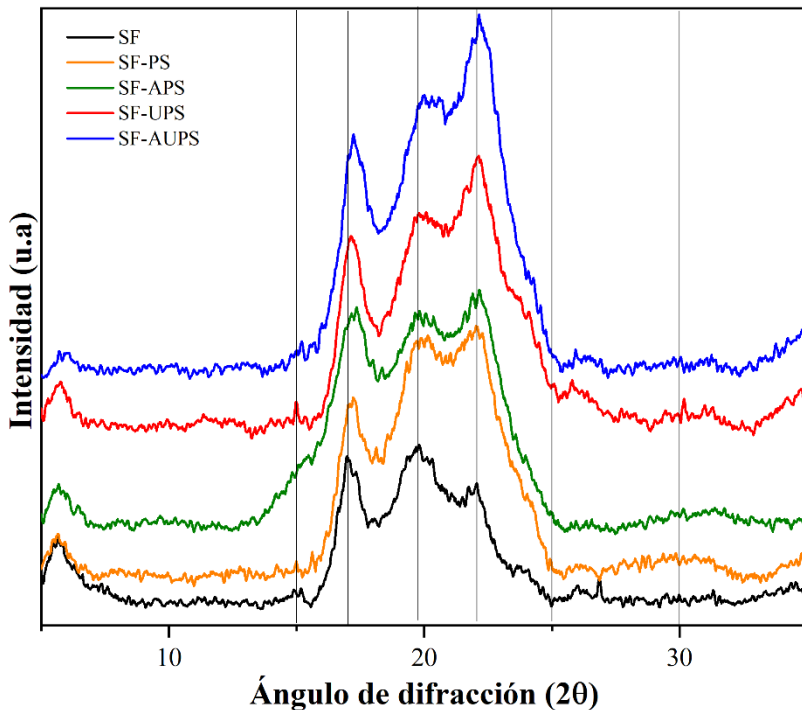


Tabla 4.3 Cristalinidad de películas de almidón con cáscara de pistache nativa y modificada. Creación propia Z. Romero, 2024.

Muestra	IC (%)
SF	50.03
SF-PS	57.82
SF-APS	58.39
SF-UPS	52.49
SF-AUPS	53.50

Figura 4.7 Patrón de difracción de rayos X de películas de almidón con cáscara de pistache nativa y modificada. Creación propia Z. Romero, 2024.

4.2.3 XPS.

Se utilizó el análisis XPS para inspeccionar la estructura molecular de películas a base de almidón que contenían cáscaras de pistache nativas y modificadas. En general, todas las muestras mostraron una composición elemental basada en picos pertenecientes a C1s y O1s, que contienen elementos C, O y H. Los enlaces químicos entre los elementos (Tabla 4.4) se identificaron mediante la deconvolución previa de los picos C1s y O1s (Figura 4.8).

Las señales C1s y O1s mostraron picos a 284.4, 286.9, 289.1, 631.5, 632.3 y 634.2 eV, correspondientes a C-C, C-O, O-C=O, O=C, C-OH y O-C=O, respectivamente. Todas las películas que contenían PS modificado mostraron una disminución en el contenido de los grupos hidroxilo, lo que indica que los grupos C-OH (de O1s) del almidón y el glicerol ya no interactúan entre sí. En cambio, sus grupos OH interactúan en mayor medida con los de las cáscaras de pistacho. Este comportamiento sugiere la oxidación de las moléculas de almidón durante el proceso de gelatinización, lo que resulta en enlaces C-C más bajos y nuevas interacciones O-C=O y O=C (a partir de C1) entre los grupos funcionales del almidón y las cáscaras de pistacho. El efecto fue más notable en las películas a base de almidón que contenían muestras de APS y AUPS, lo que corrobora que su alto contenido de fracción de celulosa cristalina interactúa mediante enlaces de hidrógeno más fuertes con las cadenas de glucosa de las moléculas de almidón.

Figura 4.8 Picos C1s y O1s desconvolucionados de películas a base de almidón que contienen cáscaras de pistache nativas y modificadas. Fuente: (I. Sifuentes, 2024)

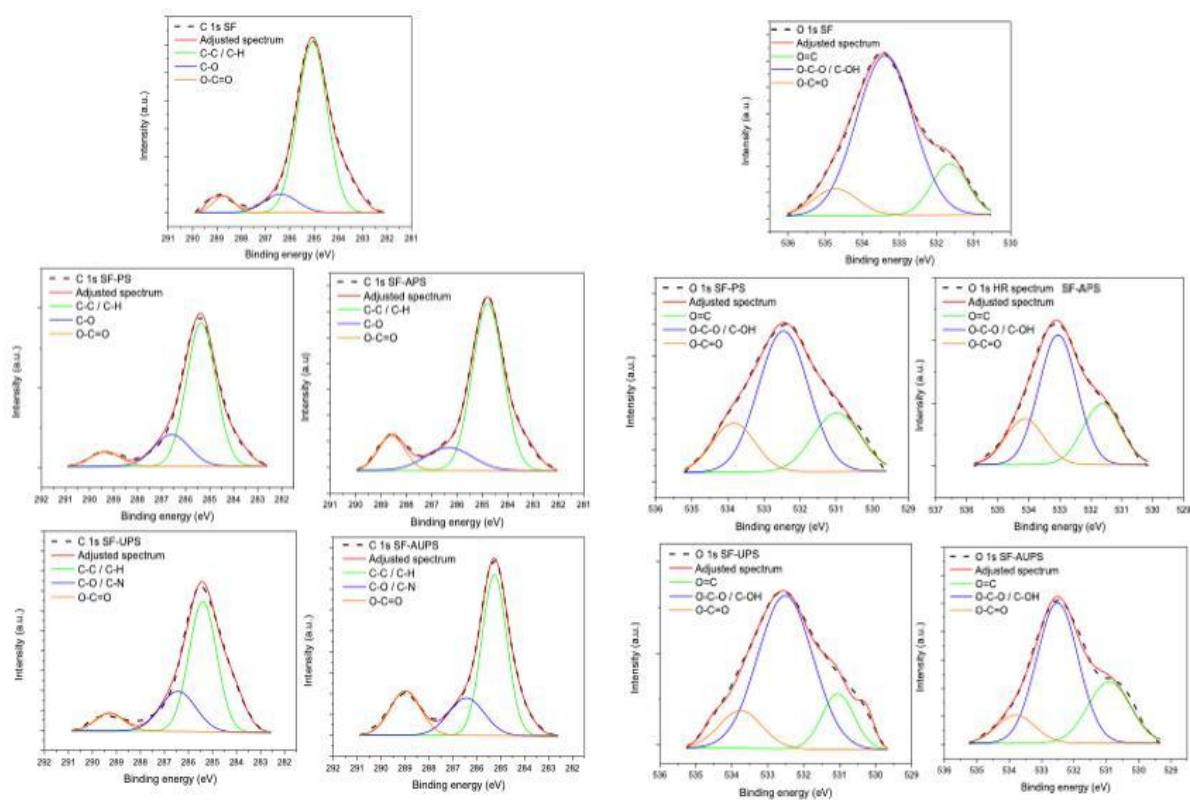


Tabla 4.4 Picos C1s y O1s de películas a base de almidón que contienen cáscaras de pistacho nativas y modificadas. Fuente: (I. Sifuentes, 2024)

MUESTRA	C-C / C-H	C-O / C-N	O-C=O	O=C	O-C-O / C-OH	O-C=O
SF	85.09	8.93	5.98	15.29	74.93	9.78
SF-PS	75.54	17.47	6.99	23.35	59.06	17.59
SF-APS	74.83	13.43	11.74	25.68	54.93	19.39
SF-UPS	71.67	20.89	7.44	18.39	66.95	14.66
SF-AUPS	64.45	17.64	17.91	27.49	61.14	11.37

4.2.4 TGA

La Figura 4.9 muestra los termogramas de las películas de almidón termoplástico con polvo de cáscara de pistache nativo y modificados. Se evidenciaron 3 etapas en la curva de pérdida de peso para la película control de almidón (SF). La primera etapa que corresponde a la pérdida de agua libre y ligada del almidón sucede por debajo de los 100 °C (Sifuentes-Nieves et al., 2021), la segunda pérdida de masa, entre 140 °C y 220 °C, se asocia a la volatilización del plastificante agregado (glicerol) (Romero-Bastida et al., 2016). La última etapa correspondiente a la degradación del almidón se observa en 313 °C (Villalobos et al., 2017). Se observó una disminución en los valores de pérdida de peso en aquellas películas que contenían cáscaras de pistache. Los valores más bajos se detectaron en las películas SF-APS y SF-AUPS, lo que indica que las cáscaras de pistache limitaron la interacción entre los grupos hidroxilo del glicerol y las moléculas de almidón. Este comportamiento promovió una alta estabilidad térmica de las películas a base de almidón que contenían PS modificado a medida que aumentaba su temperatura de descomposición. Tales resultados corroboraron la oxidación de los grupos hidroxilo de las moléculas de almidón durante el proceso de formación de la película, lo que promueve altas interacciones O-C=O y O=C entre los grupos funcionales del almidón y la celulosa cristalina de las cáscaras de pistache, como lo indicó XPS. Por otra parte, las películas con PS sin modificar y modificada tuvieron un impacto sobre la estabilidad térmica del ya que se crearon interacciones entre los polvos de cáscara de pistache y el almidón gracias a que los tratamientos promueven una composición y morfología compatible con la matriz por el aumento de cristalinidad en las películas lo cual se puede observar en la Tabla 4.5 en la técnica DRX. Además, se observó una mayor estabilidad con la muestra modificada con ultrasonido (SF-UPS) ya que este tratamiento puede causar la modificación superficial de las partículas de cáscara de pistache, aumentando la superficie específica y mejorando la adhesión entre las partículas de cáscara y la matriz de almidón.

Figura 4.9 Análisis TGA de películas de almidón que contienen PS modificado y no modificado. Creación propia Z. Romero, 2024.

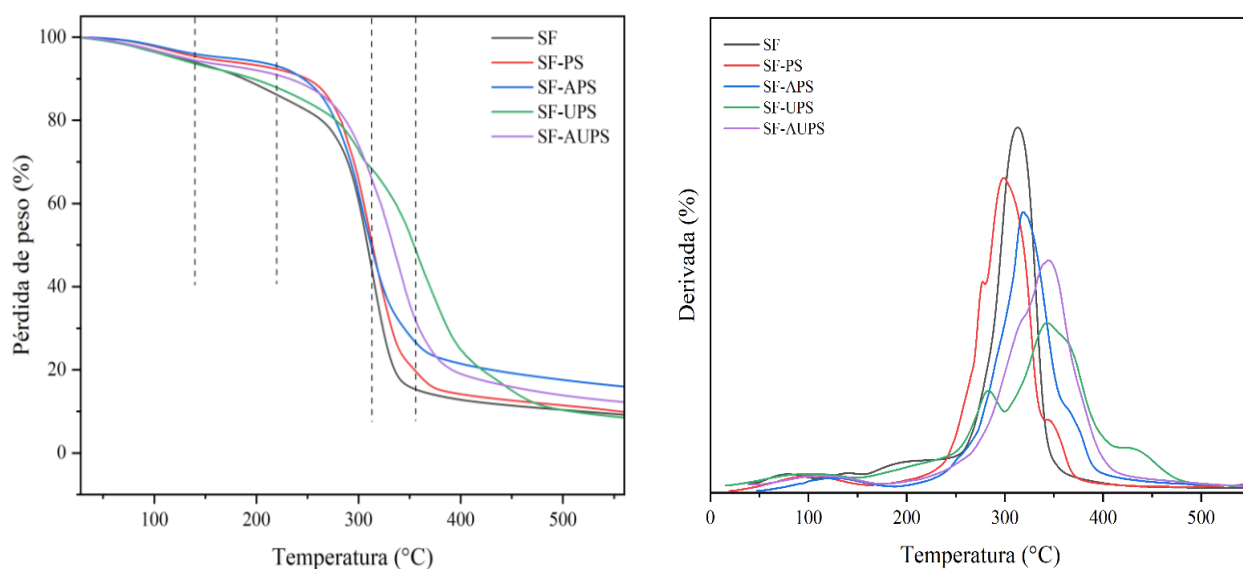


Tabla 4.5 Degradación de películas de almidón con PS nativa y modificada. Creación propia Z. Romero, 2024.

MUESTRA	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	RESIDUO
SF	7.11	7.98	75.44	--	9.46
SF-PS	5.83	19.96	53.10	9.90	11.21
SF-APS	4.97	--	63.90	14.94	16.18
SF-UPS	7.79	24.32	49.83	9.32	8.71
SF-AUPS	6.76	--	29.05	51.74	12.45

4.2.5 DMA.

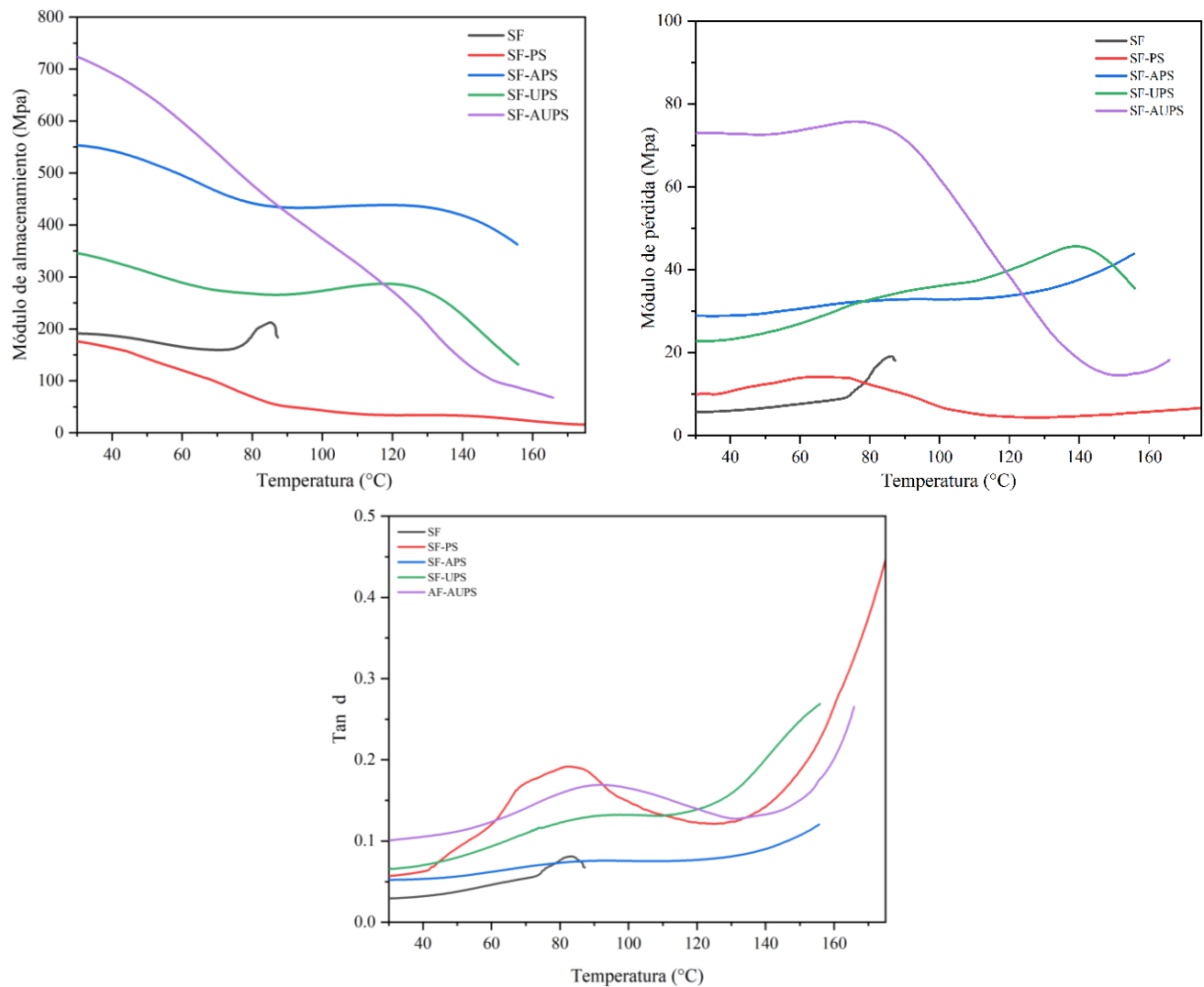
En la Figura 4.10 se presentan las curvas del módulo de almacenamiento (E'), módulo de pérdida (E'') y Tan Delta de los biocompuestos en función de la temperatura. La película de almidón SF mostró un valor inicial en E' de 191.1 MPa a una temperatura de 30°C, y la película con cáscara de pistache nativa SF-PS tuvo un E' de 175.9 MPa. Este comportamiento puede estar relacionado con la presencia de componentes lignocelulósicos más afines con el plastificante lo cual no les permite interactuar con las moléculas de almidón. Para las películas con PS modificadas se notó un incremento a 552.9 MPa (SF-APS), 345.5 MPa (SF-UPS), 722.7 MPa (SF-AUPS) con respecto a SF a una temperatura de 30°C. Esta tendencia indica una alta interacción entre los enlaces de hidrógeno de la celulosa de PS modificado y los grupos hidroxilo del almidón. El efecto fue más notable en películas que contenían APS y AUPS en comparación con aquellas con UPS, ya que su alto contenido de celulosa cristalina interactúa con el almidón en mayor medida, mejorando la transferencia de tensión en la matriz y reduciendo los espacios intermoleculares en la red, restringiendo así el movimiento de la cadena del polímero y aumentando la rigidez de las películas.

En el módulo de pérdida E'' (Figura 18b), SF mostró un valor en E'' de 5.59 MPa, por otra parte, hubo un aumento de E'' para todas las muestras adicionadas con la cáscara de pistache, siendo este aumento de 9.99 MPa (SF-PS), 28.91 MPa (SF-APS), 22.71 MPa (SF-UPS) y 72.9 MPa (SF-AUPS), lo que indica que las moléculas de almidón interactuaron a través de la unión interfacial con las superficies grabadas y porosas del PS modificado, lo que aumentó las interacciones almidón-cáscara de pistache que disiparon menos energía ya que la alta fracción de celulosa cristalina del PS modificado anclado en las moléculas estrella limitó el proceso de movimiento-relajación de las cadenas poliméricas.

La Tan δ para SF muestra un valor bajo y relativamente constante de Tan Delta en el rango de temperaturas analizadas. Todas las películas de almidón que contenían cáscara de pistache mostraron un aumento en su valor de Tan δ , esto asociado a que el movimiento de las cadenas biopoliméricas se limitó con los tratamientos realizados a las fibras. Para la película SF-PS se observa un movimiento libre de las cadenas biopoliméricas ya que la cáscara de pistache nativa contiene hemicelulosa la cual tiene cadenas hidrofílicas lo cual hace que sean afines con el plastificante. Las películas con tratamientos (SF-APS, SF-UPS, SF-AUPS) muestran un movimiento limitado de sus cadenas dado que después de los tratamientos se removieron componentes lignocelulósicos amorfos dejando así una mayor fracción de celulosa en las

cáscaras la cual tiene una morfología cristalina, que promueve la formación de interacciones más fuertes en el sistema limitando así el movimiento de las cadenas en las películas haciéndolas más resistentes.

Figura 4.10 Gráficos del análisis DMA para las películas de almidón y cáscara de pistache nativa y modificada. Creación propia Z. Romero, 2024.



5 CONCLUSIONES

Este trabajo informa sobre el efecto del tratamiento alcalino, ultrasónico y dual sobre las características estructurales de los residuos de cáscara de pistacho. Después del tratamiento alcalino, el PS exhibió superficies adelgazadas con áreas altamente grabadas, lo que promovió la eliminación parcial de sitios hidratados y componentes lignocelulósicos (hemicelulosa y lignina). El tratamiento ultrasónico solo tuvo un efecto superficial al generar poros en la superficie del PS. Sin embargo, el tratamiento dual promovió un efecto sinérgico de los tratamientos, dando como resultado superficies grabadas y altamente porosas que permitieron que las especies de NaOH actuaran internamente sobre la microestructura del PS, lo que aumentó el índice de cristalinidad de 31.41% (PS) hasta 46.91% (AUPS). La adición del PS modificado durante el proceso de formación de la película de almidón resultó en un paso de oxidación de las moléculas de almidón ya que las interacciones C-OH del almidón-glicerol se redujeron (del 74.93% al 50%, 61.14%) lo que generó una interacción más fuerte del PS modificado con almidón por enlaces O-C=O (del 5.98 al 17.91%) y O=C (del 15 al 27.49%). Estas características mejoraron los valores del módulo de almacenamiento de las películas desde 198 MPa (SF) hasta 721 MPa (SF-AUPS), aumentando así la rigidez de la película en mayor medida. Los resultados revelaron que los tratamientos evaluados son una alternativa adecuada para valorizar los desechos de cáscara de pistacho, que las industrias de embalaje pueden usar como relleno de refuerzo en películas a base de almidón.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Abe, M. M., Martins, J. R., Sanvezzo, P. B., Macedo, J. V., Branciforti, M. C., Halley, P., Botaro, V. R., & Brienzo, M. (2021). Advantages and disadvantages of bioplastics production from starch and lignocellulosic components. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 15). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym13152484>
- Agyei-Tuffour, B., Asante, J. T., Nyankson, E., Dodoo-Arhin, D., Oteng-Peprah, M., Azeko, S. T., Azeko, A. S., Oyewole, O. K., & Yaya, A. (2021). Comparative analyses of rice husk cellulose fiber and kaolin particulate reinforced thermoplastic cassava starch biocomposites using the solution casting technique. *Polymer Composites*, 42(7), 3216–3230. <https://doi.org/10.1002/pc.26052>
- Ajaj, Y., AL-Salman, H. N. K., Hussein, A. M., Khaleel Jamee, M., Abdullaev, S., Omran, A. A., Morad Karim, M., Abdulwahid, A. S., Mahmoud, Z. H., & Kianfar, E. (2024). Effect and investigating of graphene nanoparticles on mechanical, physical properties of polylactic acid polymer. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100612>
- Al Bakri, A. M. M., Liyana, J., Norazian, M. N., Kamarudin, H., & Ruzaidi, C. M. (2013). Mechanical properties of polymer composites with sugarcane bagasse filler. *Advanced Materials Research*, 740, 739–744. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.740.739>
- Alsaadi, M., Erklığ, A., & Albu-khaleefah, K. (2018). Effect of Pistachio Shell Particle Content on the Mechanical Properties of Polymer Composite. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(9), 4689–4696. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3073-x>
- Altun, M., Celebi, M., & Ovali, S. (2022). Preparation of the pistachio shell reinforced PLA biocomposites: Effect of filler treatment and PLA maleation. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 35(9), 1342–1357. <https://doi.org/10.1177/08927057211010880>
- Amaral, L., Rodrigues, F., Silva, A., Costa, P., Delerue-Matos, C., & Vieira, E. F. (2022). Reinforcement of starch film with Castanea sativa shells polysaccharides: Optimized formulation and characterization. *Food Chemistry*, 396. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133609>
- Andrady, A. L., & Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1977–1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
- Attia, A. A., Girgis, B. S., & Khedr, S. A. (2003). Capacity of activated carbon derived from pistachio shells by H3PO4 in the removal of dyes and phenolics. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 78(6), 611–619. <https://doi.org/10.1002/jctb.743>
- Balasundar, P., Narayanasamy, P., Senthil, S., Abdullah Al-Dhabi, N., Prithivirajan, R., Shyam Kumar, R., Ramkumar, T., & Subrahmanya Bhat, K. (2019). Physico-chemical study of pistachio (Pistacia vera) nutshell particles as a bio-filler for eco-friendly composites. *Materials Research Express*, 6(10). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3b9b>
- Benli, H., & Bahtiyari, M. İ. (2024). An approach for the valorization of bio-waste pistachio shells (Pistacia vera L.): Dyeing of cellulose-based fabrics. *Journal of Cleaner Production*, 445. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141213>

- Çelik, Y. H., Yalcin, R., Topkaya, T., Başaran, E., & Kilickap, E. (2021). Characterization of Hazelnut, Pistachio, and Apricot Kernel Shell Particles and Analysis of Their Composite Properties. *Journal of Natural Fibers*, 18(7), 1054–1068. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1739593>
- Chen, X., Guo, Q., & Mi, Y. (1998). Bamboo Fiber-Reinforced Polypropylene Composites: A Study of the Mechanical Properties. In *J Appl Polym Sci* (Vol. 69). John Wiley & Sons, Inc.
- Chi, H., Xu, K., Xue, D., Song, C., Zhang, W., & Wang, P. (2007). Synthesis of dodecenyl succinic anhydride (DDSA) corn starch. *Food Research International*, 40(2), 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.09.013>
- Čolnik, M., Irgolič, M., Perva, A., & Škerget, M. (2024). The Conversion of Pistachio and Walnut Shell Waste into Valuable Components with Subcritical Water. *Processes*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/pr12010195>
- da Silva, J. C. G., Alves, J. L. F., Galdino, W. V. de A., Moreira, R. de F. P. M., José, H. J., de Sena, R. F., & Andersen, S. L. F. (2018). Combustion of pistachio shell: physicochemical characterization and evaluation of kinetic parameters. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(22), 21420–21429. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8945-1>
- De Albuquerque, M. D. F., Bastos, D. C., & Simão, R. A. (2014). Surface modification of starch films by plasma. *Macromolecular Symposia*, 343(1), 96–101. <https://doi.org/10.1002/masy.201300199>
- Diyana, Z. N., Jumaidin, R., Selamat, M. Z., Ghazali, I., Julmohammad, N., Huda, N., & Ilyas, R. A. (2021a). Physical properties of thermoplastic starch derived from natural resources and its blends: A review. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 9, pp. 5–20). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym13091396>
- Diyana, Z. N., Jumaidin, R., Selamat, M. Z., Ghazali, I., Julmohammad, N., Huda, N., & Ilyas, R. A. (2021b). Physical properties of thermoplastic starch derived from natural resources and its blends: A review. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 9, pp. 5–20). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym13091396>
- Ezgi Bezirhan Arikan, & Havva Duygu Ozsoy. (2015). A Review: Investigation of Bioplastics. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 9(2). <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2015.02.007>
- García Hernández, Z., Miranda Teran, Z. N., González Morones, P., Yañez Macías, R., Solís Rosales, S. G., Romero, G. Y., Sifuentes-Nieves, I., & Hernández-Hernández, E. (2021a). Performance of nylon 6 composites reinforced with modified agave fiber: Structural, morphological, and mechanical features. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(34). <https://doi.org/10.1002/app.50857>
- García Hernández, Z., Miranda Teran, Z. N., González Morones, P., Yañez Macías, R., Solís Rosales, S. G., Romero, G. Y., Sifuentes-Nieves, I., & Hernández-Hernández, E. (2021b). Performance of nylon 6 composites reinforced with modified agave fiber: Structural, morphological, and mechanical features. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(34). <https://doi.org/10.1002/app.50857>
- Gupta, M., Brennan, C., & Tiwari, B. K. (2012). Starch-based edible films and coatings. *Starch-Based Polymeric Materials and Nanocomposites: Chemistry, Processing, and Applications; Ahmed, J., Tiwari, BK, Imam, SH, Rao, MA, Eds*, 239-254.

- Ghosh, A. K., & Dwivedi, M. (2019). Processability of Polymeric Composites. In *Processability of Polymeric Composites*. Springer India. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-3933-8>
- Hao, L. C., Sapuan, S. M., Hassan, M. R., Sheltami, R. M., & Sheltami, R. M. (2018). Natural fiber reinforced vinyl polymer composites. In *Natural Fiber Reinforced Vinyl Ester and Vinyl Polymer Composites: Development, Characterization and Applications* (pp. 27–70). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102160-6.00002-0>
- Hazrol, M. D., Sapuan, S. M., Ilyas, R. A., Zainudin, E. S., Zuhri, M. Y. M., & Abdul Wahab, N. I. (2022). Morphology and selected properties of kenaf fiber/cornhusk reinforced corn starch hybrid biocomposites. *Polimery/Polymers*, 67(11–12), 575–587. <https://doi.org/10.14314/polimery.2022.11.5>
- Hazrol, M. D., Sapuan, S. M., Zainudin, E. S., Wahab, N. I. A., & Ilyas, R. A. (2022). Effect of Kenaf Fibre as Reinforcing Fillers in Corn Starch-Based Biocomposite Film. *Polymers*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/polym14081590>
- Ibarra-Islas, A., Hernández, J. E. M., Armenta, S., López, J. E., López, P. M. G., León, S. H., & Arce-Cervantes, O. (2023). Use of Nutshells Wastes in the Production of Lignocellulolytic Enzymes by White-Rot Fungi. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 66. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2023210654>
- Jabeen, N., Majid, I., & Nayik, G. A. (2015). Bioplastics and food packaging: A review. *Cogent Food and Agriculture*, 1(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1117749>
- Jumaidin, R., Diah, N. A., Ilyas, R. A., Alamjuri, R. H., & Yusof, F. A. M. (2021). Processing and characterisation of banana leaf fibre reinforced thermoplastic cassava starch composites. *Polymers*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/polym13091420>
- Kadhim, N. N., Hamad, Q. A., & Oleiwi, J. K. (2020). Tensile and morphological properties of PMMA composite reinforced by Pistachio Shell powder used in denture applications. *AIP Conference Proceedings*, 2213. <https://doi.org/10.1063/5.0000181>
- Kainuma, K. (2012). Structure and chemistry of the starch granule. In *The Biochemistry of Plants: A Comprehensive Treatise* (Vol. 14, pp. 141–180). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092615-5.50011-4>
- Karimah, A., Ridho, M. R., Munawar, S. S., Ismadi, Amin, Y., Damayanti, R., Lubis, M. A. R., Wulandari, A. P., Nurindah, Iswanto, A. H., Fudholi, A., Asrofi, M., Saedah, E., Sari, N. H., Pratama, B. R., Fatiasari, W., Nawawi, D. S., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2021). A comprehensive review on natural fibers: Technological and socio-economical aspects. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 24). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym13244280>
- Kashaninejad, M., & Tabil, L. G. (2011). Pistachio (*Pistacia vera* L.). In *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits* (Vol. 4). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1533/9780857092618.218>

- Kaya, A., & Şahin, S. A. (2022). Acid Orange 7 adsorption onto quaternized pistachio shell powder from aqueous solutions. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(12), 6015–6032. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02414-3>
- Kaya, M., Azahin, Ö., & Saka, C. (2018). Preparation and TG/DTG, FT-IR, SEM, BET Surface Area, Iodine Number and Methylene Blue Number Analysis of Activated Carbon from Pistachio Shells by Chemical Activation. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 16(2). <https://doi.org/10.1515/ijcre-2017-0060>
- Lomelí-Ramírez, M. G., Reyes-Alfaro, B., Martínez-Salcedo, S. L., González-Pérez, M. M., Gallardo-Sánchez, M. A., Landázuri-Gómez, G., Vargas-Radillo, J. J., Diaz-Vidal, T., Torres-Rendón, J. G., Macias-Balleza, E. R., & García-Enriquez, S. (2023). Thermoplastic Starch Biocomposite Films Reinforced with Nanocellulose from Agave tequilana Weber var. Azul Bagasse. *Polymers*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/polym15183793>
- Martinl, C., & Smith, A. M. (1995). Starch Biosynthesis. In *The Plant Cell* (Vol. 7). American Society of Plant Physiologists. <https://academic.oup.com/plcell/article/7/7/971/5985032>
- Mendes, J. F., Paschoalin, R. T., Carmona, V. B., Sena Neto, A. R., Marques, A. C. P., Marconcini, J. M., Mattoso, L. H. C., Medeiros, E. S., & Oliveira, J. E. (2016). Biodegradable polymer blends based on corn starch and thermoplastic chitosan processed by extrusion. *Carbohydrate Polymers*, 137, 452–458. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.10.093>
- Mohammed, L., Ansari, M. N. M., Pua, G., Jawaid, M., & Islam, M. S. (2015). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications. In *International Journal of Polymer Science* (Vol. 2015). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2015/243947>
- Moussavi, G., & Khosravi, R. (2011). The removal of cationic dyes from aqueous solutions by adsorption onto pistachio hull waste. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(10), 2182–2189. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.11.024>
- Muhammad Shamsuddin, I. (2017). Bioplastics as Better Alternative to Petroplastics and Their Role in National Sustainability: A Review. *Advances in Bioscience and Bioengineering*, 5(4), 63. <https://doi.org/10.11648/j.abb.20170504.13>
- Nasri-Nasrabadi, B., Behzad, T., & Bagheri, R. (2014). Preparation and characterization of cellulose nanofiber reinforced thermoplastic starch composites. *Fibers and Polymers*, 15(2), 347–354. <https://doi.org/10.1007/s12221-014-0347-0>
- Nguyen Vu, H. P., & Lumdubwong, N. (2016). Starch behaviors and mechanical properties of starch blend films with different plasticizers. *Carbohydrate Polymers*, 154, 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.08.034>
- Ortuño-López, M. B., Salazar-Cruz, B. A., del Real, A., Almendarez-Camarillo, A., López-Barroso, J., Rivera-Armenta, J. L., & Flores-Hernández, C. G. (2023). Physical Properties of Thermoplastic Cornstarch/Hibiscus sabdariffa Fiber Obtained by Evaporation Casting. *Starch/Stärke*, 75(5–6). <https://doi.org/10.1002/star.202200242>

- Popescu, C. M. (2017). Wood as bio-based building material. In *Performance of Bio-based Building Materials* (pp. 21–96). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100982-6.00002-1>
- Química del almidón*. (n.d.).
- Roc, C. S. (s. f). *Expectativas de la producción del pistacho | Casa Sant Roc*. <https://www.viverosdepistachocsr.com/manual-pistacho/produccion-pistacho>
- Romero-Bastida, C. A., Tapia-Blácido, D. R., Méndez-Montevalvo, G., Bello-Pérez, L. A., Velázquez, G., & Alvarez-Ramirez, J. (2016). Effect of amylose content and nanoclay incorporation order in physicochemical properties of starch/montmorillonite composites. *Carbohydrate Polymers*, 152, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.009>
- Šárka, E., & Dvořáček, V. (2017). Waxy starch as a perspective raw material (a review). In *Food Hydrocolloids* (Vol. 69, pp. 402–409). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.03.001>
- Shaker, K., & Nawab, Y. (n.d.). *SPRINGER BRIEFS IN MATERIALS Lignocellulosic Fibers Sustainable Biomaterials for Green Composites*. <https://link.springer.com/bookseries/10111>
- Shankaran, D. R. (2018). Cellulose Nanocrystals for Health Care Applications. In *Applications of Nanomaterials: Advances and Key Technologies* (pp. 415–459). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101971-9.00015-6>
- Sheikh-Ahmad, J. Y. (n.d.). *Machining of Polymer Composites*.
- Sidek, I. S., Draman, S. F. S., Abdullah, S. R. S., & Anuar, N. (2019a). 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>
- Sidek, I. S., Draman, S. F. S., Abdullah, S. R. S., & Anuar, N. (2019b). 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>
- Sifuentes-Nieves, I., Yáñez Macías, R., Neira Velázquez, G., Velázquez, G., García Hernández, Z., Gonzalez Morones, P., & Hernández-Hernández, E. (2021). Biobased sustainable materials made from starch and plasma/ultrasound modified Agave fibers: Structural and water barrier performance. *International Journal of Biological Macromolecules*, 193, 2374–2381. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.071>
- Solís Rosales, S. G., Sifuentes-Nieves, I., Naranjo Naranjo, L., González Morones, P., Yáñez Macías, R., Hernández Gámez, J. F., García Hernández, Z., & Hernández Hernández, E. (2022). Insights on the performance of modified agave fibers on polypropylene matrix: physicochemical and mechanical features. *Journal of Polymer Research*, 29(9). <https://doi.org/10.1007/s10965-022-03228-7>
- Tavares, T. D., Antunes, J. C., Ferreira, F., & Felgueiras, H. P. (2020). Biofunctionalization of natural fiber-reinforced biocomposites for biomedical applications. In *Biomolecules* (Vol. 10, Issue 1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/biom10010148>

- Toghiani, J., Fallah, N., Nasernejad, B., Mahboubi, A., Taherzadeh, M. J., & Afsham, N. (2023). Sustainable Pistachio Dehulling Waste Management and Its Valorization Approaches: A Review. In *Current Pollution Reports* (Vol. 9, Issue 1, pp. 60–72). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s40726-022-00240-9>
- Villalobos, K., Rojas, H., González-Paz, R., Granados, D. B., González-Masís, J., Vega Baudrit, J., & Corrales-Ureña, Y. R. (2017). Production of starch films using propolis nanoparticles as novel bioplasticizer. *Journal of Renewable Materials*, 5(3–4), 189–198. <https://doi.org/10.7569/JRM.2017.634109>
- Wang, S., Li, J., Li, F., Li, J., Zhang, C., Ji, M., Man, J., & Peng, S. (2024). Study on the influential effect of different CaCO₃ particle sizes on the internal pore structure of starch/fiber foaming composite materials. *Materials Today Communications*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107867>
- Www, W. :, Reddy, R. L., Reddy, V. S., & Gupta, G. A. (2008). International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Study of Bio-plastics As Green & Sustainable Alternative to Plastics. In *Certified Journal* (Vol. 9001, Issue 5). www.ijetae.com
- Chen, X., Guo, Q., & Mi, Y. (1998). Bamboo fiber-reinforced polypropylene composites: A study of the mechanical properties. *Journal of applied polymer science*, 69(10), 1891–1899.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12–13), 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- Yetilmezsoy, K., & Demirel, S. (2008). Artificial neural network (ANN) approach for modeling of Pb(II) adsorption from aqueous solution by Antep pistachio (*Pistacia Vera L.*) shells. *Journal of Hazardous Materials*, 153(3), 1288–1300. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.092>

7 ANEXOS

7.1 Carta de aceptación. Fuente: Carta de aceptación proporcionada por CIQA, 2024



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS

CIQA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN QUÍMICA APLICADA

Saltillo, Coah. a 12 de febrero del 2024

Asunto: Carta de aceptación para
realizar Residencia Profesional en el CIQA

ARQ. JOSÉ ANTONIO ROMERO ESPINOSA

Jefe de la División de estudios Profesionales
del Instituto Tecnológico de Pachuca

PRESENTE:

Por medio de la presente manifiesto que la estudiante de la carrera de Ingeniería química del Instituto Tecnológico de Pachuca (ITP) **ZURISHADAI ROMERO CERÓN**, con número de control 18200282, está aceptada para realizar su Residencia Profesional en el Departamento de materiales avanzados y Laboratorio Central del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) y asignada al Dr. Israel Sifuentes Nieves y el Dr. Ernesto Hernández Hernández como asesores. El título del trabajo a desarrollar es "Efecto de los tratamientos químicos y físicos sobre las propiedades estructurales de desechos de cáscara de pistache y su desempeño en matrices biopoliméricas". La estudiante estará realizando su residencia profesional en el periodo del 19 de febrero y hasta el 21 de junio del 2024 cubriendo un total de 500 h. en un horario de 8:00 a 15:00 hrs.

Sin otro particular que tratar por el momento, aprovecho la ocasión para enviarte un cordial saludo y quedo ante usted para cualquier aclaración.

ATENTAMENTE


Lic. BLANCA CECILIA CONTRERAS TORRES
Jefa del Depto. De Recursos Humanos
Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA)

Bvld. Enrique Reyna Heras No. 140, San José de los Cerritos, CP. 25294, Saltillo, Coah., México.
Tel: (844) 438 9630 www.ciqa.mx



7.2 Carta de terminación. Fuente: Carta de terminación proporcionada por CIQA, 2024

**GOBIERNO DE
MÉXICO**

**CONAHCYT**
CONSEJO NACIONAL DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS

**CIQA**
CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN QUÍMICA APLICADA