

# Universidad del Papaloapan

*Campus Tuxtepec*

Licenciatura en Ciencias Químicas

**“Elaboración y caracterización de películas de  
Almidón/Hule/Acrílico”**

**Tesis**

Que para obtener el título de:

**Licenciado en Ciencias Químicas**

Presenta:

**Victor Roberto Ruiz Ruiz**

Director:

**Dr. Aurelio Ramírez Hernández**



# Universidad del Papaloapan

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca a 10 de mayo del 2024

UNPA/LCQ/107/2024

**Asunto:** Autorización de impresión de tesis

**M.E. Yesenia Barrientos Arenal**  
**Jefa de Servicios Escolares**  
**Universidad del Papaloapan**  
**P R E S E N T E**

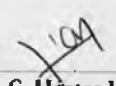
Con base en el dictamen de la comisión revisora, se autoriza la impresión del trabajo de tesis presentado por el egresado de la Licenciatura en Ciencias Químicas VICTOR ROBERTO RUIZ RUIZ y que lleva por título "Elaboración y caracterización de películas de Almidón/Hule/Acrílico" para su presentación y defensa por parte del egresado y así obtener el título de Licenciado en Ciencias Químicas, toda vez que cumple satisfactoriamente con la reglamentación establecida para tal fin.

Sin otro asunto en particular me despido cordialmente agradeciendo la atención a la presente.

**Atentamente**  
*terra uberrima, mens aperta*  
*Bon Lo-tama, chi ji ju*



**Jorge Carlos Conde Acevedo**  
**Jefe de Carrera**  
**Lic. en Ciencias Químicas**  
UNPA  
terra uberrima, mens aperta  
Bon Lo-tama, chi ji ju  
OAXACA  
LICENCIATURA EN  
CIENCIAS QUÍMICAS  
CAMPUS TUXTEPEC



**Vo.Bo. M.C. Héctor López Arjona**  
**Vicerrector Académico**  
**Universidad del Papaloapan**  
UNPA  
terra uberrima, mens aperta  
Bon Lo-tama, chi ji ju  
OAXACA  
VICE-RECTORIA  
ACADEMICA

C.c.p. Dr. Aurelio Ramírez Hernández. Director de tesis. Para su conocimiento.  
C.c.p. Víctor Roberto Ruiz Ruiz. Tesisista egresado. Para su conocimiento.  
C.c.p. Archivo



# Universidad del Papaloapan

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca a 10 de mayo del 2024

UNPA/LCQ/106/2024

**Asunto:** Designación de sinodales

**C. Victor Roberto Ruiz Ruiz**  
**Pasante de la carrera de Licenciatura en Ciencias Químicas**  
**PRESENTE**

Por este medio le informo la propuesta de la jefatura de carrera de los profesores investigadores que fungirán como sinodales en el examen de defensa de tesis para obtener el título de Licenciado en Ciencias Químicas.

El jurado del examen profesional estará compuesto por los siguientes profesores investigadores:


Presidente: Dr. Jorge Carlos Conde Acevedo  
Secretario: Dr. Miguel Ángel García Muñoz  
Vocal: Dr. Aurelio Ramírez Hernández  
Primer Suplente: Dr. Francisco Noé Mendoza Ambrosio  
Segundo Suplente: Dr. Paul Mauricio Sánchez Ocampo

Sin otro asunto en particular me despido cordialmente agradeciendo la atención a la presente.

**Atentamente**  
*terra uberrima, mens aperta*  
*B'ou Lo-tama, chi ji ju*



UNPA  
*terra uberrima, mens aperta*  
*B'ou Lo-tama, chi ji ju*  
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN  
OAXACA  
**Dr. Jorge Carlos Conde Acevedo**  
Jefe de Carrera  
Licenciatura en Ciencias Químicas  
LICENCIATURA  
CIENCIAS QUÍMICAS  
CAMPUS TUXTEPEC



UNPA  
*terra uberrima, mens aperta*  
*B'ou Lo-tama, chi ji ju*  
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN  
OAXACA  
**Vo.Bo. M.C. Héctor López Arjona**  
Vicerrector Académico  
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN  
VICE-RECTORIA  
ACADEMICA

C.c.p. Dr. Aurelio Ramírez Hernández. Director de tesis. Para su conocimiento.  
C.c.p. Victor Roberto Ruiz Ruiz. Tesisista egresado. Para su conocimiento  
C.c.p. Archivo

**OAXACA**

Campus Loma Bonita  
Av. Ferrocarril S/N Col. Ciudad Universitaria, Loma Bonita, Oaxaca C.P. 68400  
Tel/Fax: 01 281 872 92 30

[www.unpa.edu.mx](http://www.unpa.edu.mx)

Campus Tuxtepec  
Circuito Central N° 200, Col. Parque Industrial C.P. 68301  
Tel/Fax: 01 281 875 9240

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi director de tesis el **Dr. Aurelio Ramírez Hernández**, por brindarme su apoyo en todo el proceso, compartir su conocimiento y siempre darme ánimos.

A mis revisores, **Dr. Paul Sánchez Ocampo**, **Dr. Francisco Noé Mendoza**, por su valioso tiempo invertido en las observaciones y comentarios para el mejoramiento de este trabajo de tesis.

A Fátima por ayudarme en el proceso administrativo y darme ánimos.

A Naye, por su apoyo en el laboratorio.

Y a todos mis amigos y compañeros que me apoyaron a lo largo de los semestres.

## **DEDICATORIA**

A mi madre que siempre fue mi LUZ y guía en los momentos difíciles, a mi padre ROBERTO que siempre creyó en mí brindándome ambos su apoyo incondicional.

## Contenido

Lista de Figuras .....	8
1 INTRODUCCIÓN .....	10
2 MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Almidón. ....	11
2.2 Caucho Natural .....	16
2.3 Acrílicos.....	20
2.3.1 Polimetilmetacrilato (PMMA). ....	21
2.4 Propiedades mecánicas de las películas.....	23
3 ANTECEDENTES.....	25
4 JUSTIFICACIÓN.....	29
5 HIPÓTESIS.....	30
6 OBJETIVOS.....	31
6.1 Objetivo General.....	31
6.2 Objetivos particulares. ....	31
7 PARTE EXPERIMENTAL.....	32
7.1 Materiales.....	32
7.2 Extracción almidón.....	32
7.3 Extracción del látex. ....	32

8	METODOLOGÍA .....	34
8.1	Elaboración de las películas.....	34
8.2	Caracterización .....	35
8.2.1	Espectrometría infrarroja con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR) .....	35
8.2.2	Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	36
8.2.3	Análisis termogravimétrico (TGA) .....	36
8.2.4	Análisis de difracción de rayos X (DRX). .....	37
8.2.5	Hidrolisis acuosa de las películas.....	37
9	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
9.1	Aislamiento del almidón.....	38
9.2	Elaboración de la Películas .....	38
9.3	Análisis por Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier. ....	43
9.4	Análisis termogravimétrico.....	50
9.5	Pruebas Mecánicas.....	56
	Promedio de tres repeticiones $\pm$ error estándar. ....	56
9.6	Determinación de la humedad. ....	58
9.7	Prueba de Hidrolisis.....	59
9.8	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB - SEM) .....	61
10	CONCLUSIONES.....	65
11	REFERENCIAS .....	66

## Lista de Figuras

Figura 1. Algunas fuentes botánicas de almidón: a) maíz, b) papa, c) plátano macho, d) frijoles.-----	11
Figura 2. Micrografía electrónica de barrido del almidón de maíz (a), trigo (b), arroz (c) y papa (d).-----	12
Figura 3. Micrografía electrónica de barrido del almidón de plátano macho.-----	12
Figura 4. Estructura química de la amilosa a) y amilopectina b).-----	14
Figura 5. Estructura química del caucho natural formada por monómeros de isopreno con isomería cis.-----	16
Figura 6. Representación esquemática de la estructura del látex.-----	17
Figura 7. Derivados el ácido acrílico y metacrílico.-----	21
Figura 8. Deformación de los materiales.-----	23
Figura 9. Elaboración de las películas por el método casting.-----	35
Figura 10. Fotos de las películas a) 50:50, b) 60:40, c) 70:30, d) 80:20.-----	42
Figura 11. Espectros de infrarrojo del látex, almidón de plátano, acrílico (sólido, líquido).44	
Figura 12. Espectros de infrarrojo de las películas elaboradas, a) 50:50, b) 60:40, c) 70:30, d) 80:20.-----	48
Figura 13. Curvas de TGA obtenidas de las películas elaboradas: A (Almidón Nativo), B (50:50 almidón/caucho), C (60:40 almidón/caucho), D (70:30 almidón/caucho), E (80:20 almidón/caucho).-----	54
Figura 14. Porcentaje de humedad de las películas almidón/caucho/acrílico.-----	58

Figura 15. Pruebas de hidrolisis acuosa de las películas.----- 60

Figura 16. Micrografías de las películas elaboradas: A (Almidón Nativo), B (50:50 almidón/caucho), C (60:40 almidón/caucho), D (70:30 almidón/caucho), E (80:20 almidón/caucho).----- 63

# 1 INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la industria de los biomateriales, las películas de almidón han sido gran interés debido a su origen renovable y su capacidad de degradarse en el medio ambiente. Sin embargo, las películas de solo almidón presentan limitaciones en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de permeabilidad al vapor de agua y gases, lo que ha impulsado la búsqueda de nuevas estrategias para mejorar su rendimiento. En este contexto, surge la necesidad de explorar la combinación de estas con diferentes materiales para disminuir su hidrofiliidad y su fragilidad a la ruptura. En este proyecto, titulado "Elaboración y caracterización de películas de Almidón/Hule/Acrílico", se buscó abordar estas combinaciones físicas mediante la incorporación de caucho natural y acrílicos como reforzantes en la matriz de almidón.

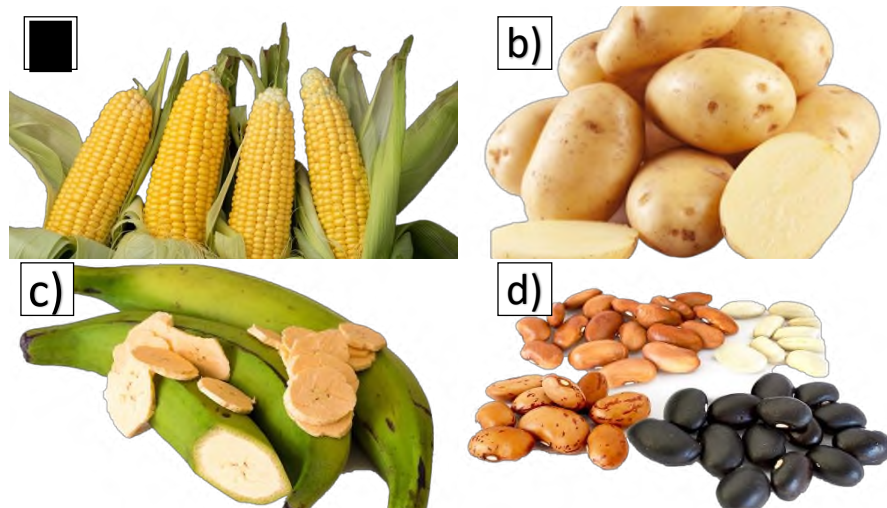
En la literatura se han reportado diversas investigaciones sobre mezclas físicas del almidón con otros materiales para mejorar las propiedades mecánicas de las películas de almidón, sin embargo, hasta el momento no se han reportado trabajos en donde se haya explorado específicamente la combinación de almidón de plátano macho con hule y acrílico para la elaboración de películas. Por lo cual, la adición de caucho natural y acrílicos, en la matriz del almidón pueden mejorar la elasticidad de esta, así como su punto a la fractura, módulo de Young y su afinidad al agua.

El objetivo principal de este proyecto fue elaborar y caracterizar películas de almidón/hule/acrílico utilizando almidón de plátano macho como matriz polimérica.

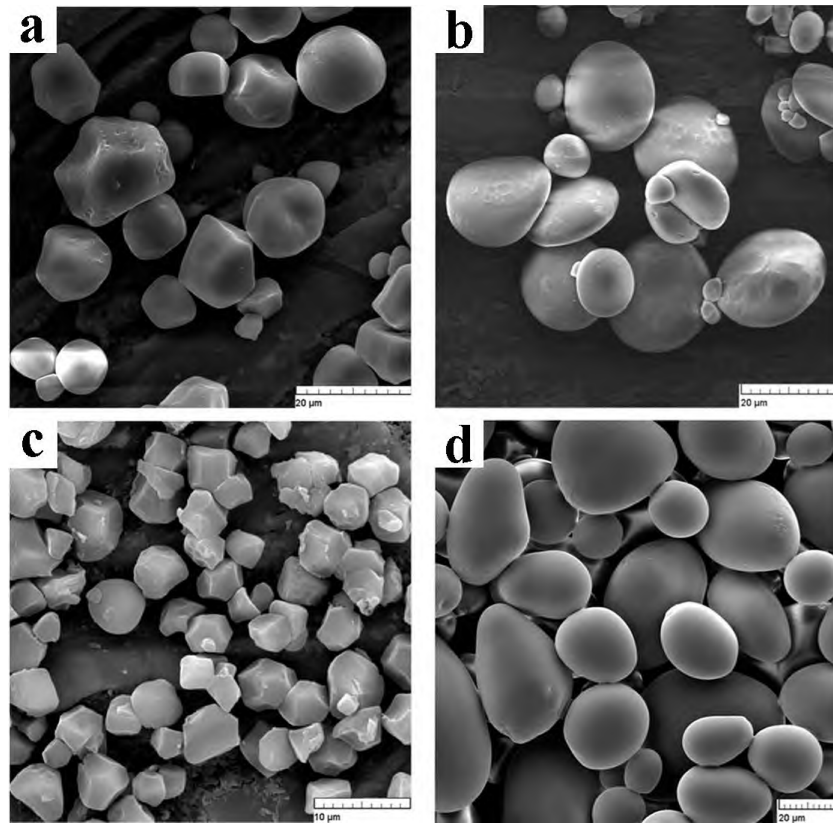
## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Almidón.

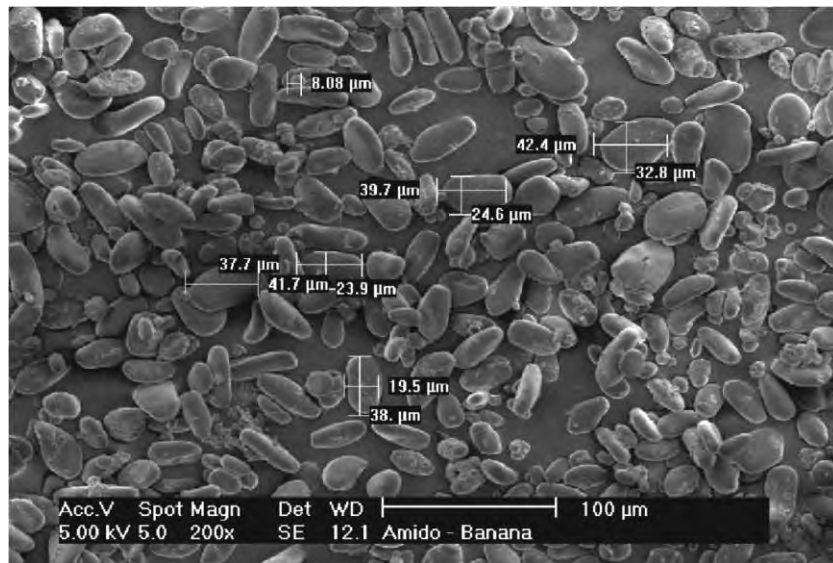
El almidón es un polisacárido compuesto por una cadena de moléculas de glucosa unidas entre sí mediante enlaces glucosídicos alfa (1-4). Se trata del principal alimento de reserva de las plantas y una fuente de energía para los seres vivos, se encuentra principalmente en cereales (maíz, arroz, trigo, etc.), tubérculos (papa, camote, yuca, etc.), en leguminosas (frijoles, chícharos, haba, etc.), y en frutas (mango, plátano, etc.) (**Figura 1**). Después de la celulosa, el almidón es el hidrato de carbono más abundante en la biosfera, motivo por el cual es ampliamente utilizado en diversas áreas industriales. La morfología de los gránulos de almidón varía dependiendo de la fuente botánica de la cual provenga (**Figura 2**), por ejemplo, el almidón de plátano macho presenta formas ovales, elipsoidales o irregulares alargadas con un tamaño promedio de  $20\mu\text{m}$  a  $100\mu\text{m}$  (**Figura 3**) [1]. La forma y el tamaño de los gránulos afecta significativamente las propiedades físicas y químicas del almidón.



**Figura 1.** Algunas fuentes botánicas de almidón: a) maíz, b) papa, c) plátano macho, d) frijoles.



**Figura 2.** Micrografía electrónica de barrido del almidón de maíz (a), trigo (b), arroz (c) y papa (d) [2].



**Figura 3.** Micrografía electrónica de barrido del almidón de plátano macho [3].

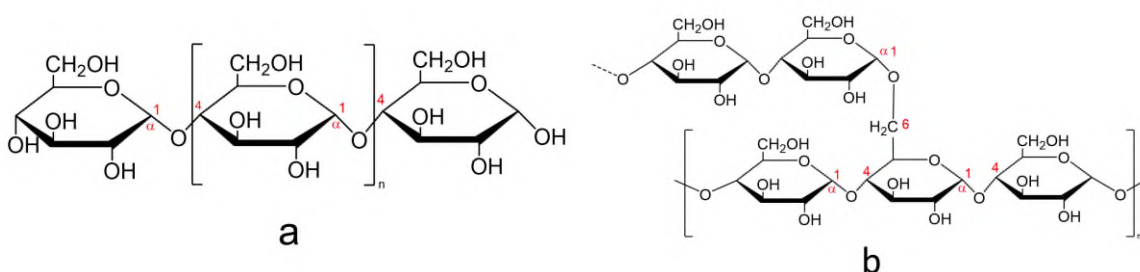
Otro aspecto importante que también depende del tipo de fuente es el porcentaje de almidón que se pueda extraer de esta. En la **Tabla 1**, se en lista la composición química de las principales fuentes de almidón, siendo el plátano macho una de las fuentes que presenta valores altos de almidón.

**Tabla 1.** Composición química de las principales fuentes de almidón. [4, 5, 6, 7]

Fuente	Humedad	Almidón	Proteínas	Lípidos	Cenizas
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Arroz	16.0	83.60	0.45	0.80	0.50
Maíz	13.0	85.92	0.35	0.60	0.10
Trigo	14.0	84.59	0.40	0.80	0.15
Sorgo	13.0	85.92	0.30	0.70	0.08
Papa	19.0	80.41	0.06	0.050	0.40
Tapioca	13.0	86.59	0.10	0.10	0.20
Amaranto	6.0	92.10	0.10	0.40	1.40
Plátano macho	6.6	90.00	1.60	1.70	0.10

Desde un enfoque químico, el almidón es un polímero semi-cristalino compuesto principalmente de dos polímeros de D-glucosa: la amilosa y la amilopectina. La amilosa es un polímero esencialmente lineal de unidades de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$  (1-4), su masa molecular se encuentra aproximadamente entre  $1 \times 10^5$  -  $1 \times 10^6$  Da. Por otra parte, la amilopectina es polímero ramificado con cadenas de glucanos unidas por enlaces  $\alpha$  (1-6), localizadas cada 25-30 unidades de glucosa, presenta una masa molar aproximada de  $1 \times 10^7$ - $1 \times 10^9$  Da. La proporción de amilosa y amilopectina varía dependiendo de la fuente botánica de almidón,

estas diferentes proporciones le confieren propiedades fisicoquímicas y funcionales. Por ejemplo, almidones con altos contenidos de amilosa facilitan la formación de películas, pero presentan poca solubilidad en agua y dificultad en su degradación con respecto a almidones con alto contenido de amilopectina [1].



**Figura 4.** Estructura química de la amilosa a) y amilopectina b).

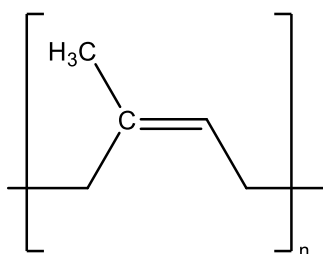
El almidón es uno de los polisacáridos utilizados para formar películas biodegradables debido a su capacidad para formar una matriz continua, su baja permeabilidad al oxígeno y su bajo costo en comparación con películas sin almidón. Algunas de las características que presentan las películas de almidón son transparencia, son inodoras, insípidas e incoloras, de ahí su atractivo para aplicarse en materiales de envasado de alimentos. Sin embargo, cuando sus propiedades se comparan con las películas a base de polímeros plásticos, las películas a base de almidón presentan grandes desventajas, como un carácter hidrofílico y propiedades mecánicas muy pobres [8]. A pesar de esto el almidón es utilizado en diversas industrias, una de ellas es la farmacéutica. La aplicación del almidón en la industria farmacéutica abarca desde su uso como ingrediente no activo, administración de fármacos, hasta recubrimiento y aglutinante en medicamentos. También es un importante

excipiente, que la industria utiliza ampliamente. Esto se debe a sus características y propiedades físicas, la capacidad de moldearse, la gelificabilidad y la capacidad aglutinante. Además, su abundancia y disponibilidad, junto con su bajo coste, biodegradabilidad y biocompatibilidad, lo convierten en un material atractivo para la industria [9].

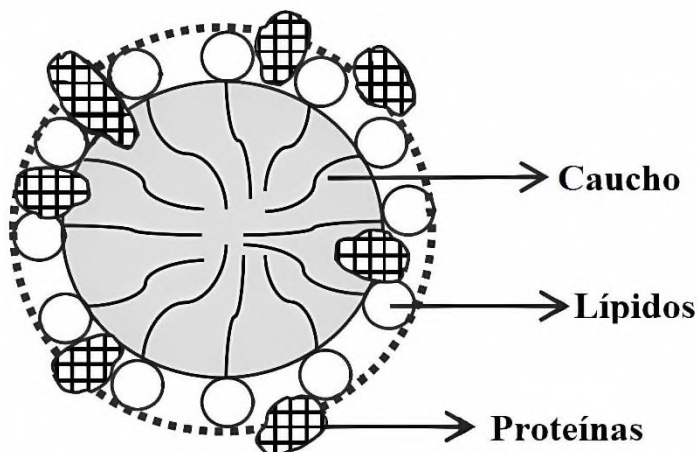
Con el fin de modificar las propiedades base del almidón se han realizado estudios de elaboración de películas mezclando el almidón con distintos componentes que afecten sus propiedades fisicoquímicas, un ejemplo es la Poly( $\epsilon$ -caprolactone), la cual genera películas con una mayor facilidad de degradación en solución acuosa. El material que engloba la mayoría de las modificaciones al almidón es el TPS, o almidón plastificado, el cual se genera a través de la creación de enlaces de hidrógeno entre los grupos hidroxilo del almidón y ciertas moléculas como agua, glicerol y sorbitol, comúnmente referidas como “plastificantes”. Cuando estos plastificantes están presentes, se aumenta la temperatura (90-180 °C) y fuerzas de cizallamiento, el almidón se derrite y fluye con facilidad. Esto permite su uso en procesos de fabricación como inyección, extrusión o soplado, similares a los empleados para los polímeros termoplásticos sintéticos. El TPS tiene una amplia gama de aplicaciones, incluyendo el embalaje de alimentos, utensilios de comida desechables, bolsas de basura, películas compostables, y bolsas para uso en agricultura y comercio minorista. Sin embargo, el TPS presenta algunos inconvenientes, como la tendencia a retrogradar con el tiempo, una alta hidrofiliidad y unas propiedades mecánicas insatisfactorias, sobre todo en entornos húmedos o secos. Para solucionar estos inconvenientes del TPS se utilizan varios enfoques, por ejemplo, la selección de diferentes fuentes de almidón, el uso de diferentes tipos de plastificantes, la mezcla de TPS con otros polímeros (naturales y sintéticos) y el uso de rellenos o materiales de refuerzo.

## 2.2 Caucho Natural

El caucho natural, también conocido como hule, es un polímero natural formado por monómeros de isopreno en una configuración *cis* (*cis*-1,4-poliisopreno) (**Figura 5**), se obtiene principalmente del látex del árbol *Hevea Brasiliensis*, dicho látex se considera una dispersión coloidal formada principalmente por partículas de caucho rodeadas por una fina capa de proteínas, lípidos y cadenas largas de ácidos grasos, lo que confiere a la partícula una carga negativa y garantiza la estabilidad coloidal del medio. Los usos del hule en México datan de la época de los Olmecas, donde era utilizado principalmente para la elaboración de la pelota utilizada en el juego de pelota, así como también en mangos de herramientas y figuras para representar deidades. De igual manera los indígenas de las cuencas bajas del río Amazonas utilizaban el látex como protector para la humedad sumergiendo su calzado en la savia del árbol *Hevea Brasiliensis*. En 2016 la producción de Hule en México alcanzó las 62.4 mil toneladas, siendo Veracruz el principal estado productor, esto según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP).



**Figura 5.** Estructura química del caucho natural formada por monómeros de isopreno con isomería *cis*.



**Figura 6.** Representación esquemática de la estructura del látex [10].

El látex es un sistema coloidal compuesto por una fracción de 30-40% (m/v) de partículas de hule, con un diámetro aproximado de  $0.1 \sim 3 \mu\text{m}$ , lo restante se compone de proteínas y lípido. Las cadenas poliméricas del caucho natural presentan una conformación irregular en estado sólido, es incapaz de cristalizar de forma natural y, por lo tanto, existe como un material amorfo y gomoso, lo que le confiere una alta resistencia y un elevado alargamiento a la rotura, debido a esto, es ampliamente utilizado como material reductor de golpes y vibraciones. Sin embargo, es muy sensible al calor y a la oxidación debido a la existencia de dobles enlaces en sus cadenas, la presencia de estos dobles enlaces hace posible que las cadenas puedan entrecruzarse al ser expuesto al calor. Es apolar, y por lo tanto soluble en disolventes alifáticos, aromáticos y clorados, sin embargo, su alto peso molecular dificulta su solubilidad.

La industria del caucho se ha basado fundamentalmente en la aspiración de fabricar mejores productos de caucho a un costo mínimo. Los cauchos se mezclan con frecuencia para obtener las propiedades óptimas requeridas para un rendimiento óptimo del producto de caucho durante un lapso específico en un determinado ambiente. Las mezclas de caucho

también tienen un uso generalizado en varias aplicaciones tecnológicas (p. ej., la industria de los neumáticos, el calzado, las correas, etc.). Los cauchos típicos incluidos son el caucho de estireno butadieno (SBR), el caucho natural (NR) y el caucho de butadieno (BR) [11].

El caucho también ha sido objetivo de estudio en el área de la biomedicina como material biocompatible, el NR ha mostrado diferentes características que lo convierten en un material atractivo para ser utilizado como biomaterial capaz de estimular la reparación y el crecimiento de los tejidos adyacentes. Además, las propiedades angiogénicas del NR, debidas al hecho de garantizar el suministro de sangre en el lugar del implante, han fomentado el estudio de la aplicación del NR en la ingeniería de tejidos.

Okamoto [12] evaluó la respuesta biológica de NRL in vitro contra varios tipos de células, como células de cáncer de ovario humano (A2780), células de cáncer de pulmón humano (A549), células madre mesenquimales humanas (hMSCs) y células de osteoblastos (MC3T3-E1). Se ha comprobado que las partículas NRL tienen una citotoxicidad notable contra células cancerosas como A549 y A2780. Este efecto se debe principalmente a las proteínas de la superficie de las partículas NRL. Sin embargo, las partículas NRL estimularon y mejoraron aún más la proliferación celular de las células MC3T3-E1 y hMSC. También se ha comprobado que en el caso de las partículas compuestas NRL-HA, en las que se depositó HA (el principal componente mineral del hueso) sobre la superficie de las partículas NRL, se produjo una mejora de su biocompatibilidad, estimulando la diferenciación de los osteoblastos. Además, los resultados del análisis de genes revelaron que las partículas NRL también inducen la diferenciación de cartílago en las hMSC. Okamoto concluyó que las partículas NRL son biomateriales que pueden aplicarse en ingeniería biotecnológica.

Morise et al. describieron un método para producir membranas NRL cargadas con butilbromuro de escopolamina [13]. El material fue desarrollado para ser empleado en el

control salival en el tratamiento de la hipersalivación. Las membranas de NR fueron capaces de liberar alrededor del 30,2% del contenido inicial de escopolamina en las primeras 24 h, y un máximo del 65,3% hasta las 72 h. Con alta flexibilidad y elongación, y sin efectos hemolíticos, la biomembrana se consideró una alternativa potencial para el tratamiento de la hipersalivación, según afirmaron los autores. De forma diferente, en su método para producir membranas NR cargadas con fármacos, los autores polimerizaron primero las membranas NR en ausencia del fármaco. Después, se realizó un paso de lavado para eliminar las proteínas naturales de la matriz, que interferían en la liberación del fármaco, según las bandas FTIR adicionales observadas cuando se cargó escopolamina antes de la polimerización de las NR. Además, el fármaco se adsorbió en las membranas NR mediante un método de inmersión.

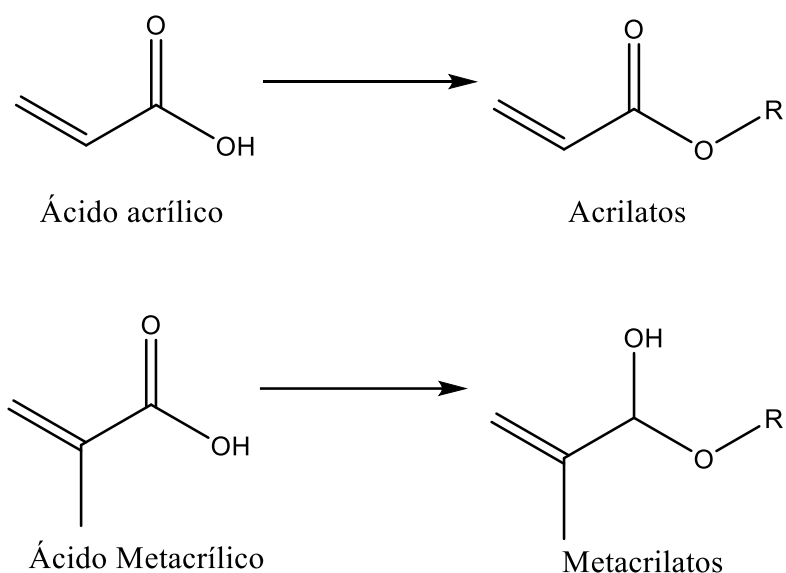
Debido a aplicaciones como las anteriormente mencionadas, la importancia comercial de las mezclas de caucho está aumentando, también considerando el hecho de que el rendimiento de los cauchos de uso general se puede mejorar mediante la unificación de los cauchos disponibles en el mercado para satisfacer las necesidades y los requisitos de las industrias de materiales de alto rendimiento.

## 2.3 Acrílicos.

Los acrílicos forman parte de los poliacrilatos, los cuales son una familia de polímeros derivados del ácido acrílico y ácido metacrílico (**Figura 6**). El ácido acrílico es un compuesto orgánico, es el ácido carboxílico insaturado más simple, formado por un grupo vinilo conectado directamente a una terminación de ácido carboxílico. El ácido acrílico y sus ésteres se combinan fácilmente consigo mismos o con otros monómeros al reaccionar en su doble enlace, formando homopolímeros o copolímeros que se utilizan en la fabricación de diversos plásticos, revestimientos, adhesivos, elastómeros, así como abrillantadores de suelos y pinturas. Los poliacrilatos son materiales con propiedades como la transparencia y la durabilidad, por lo que son utilizados en una amplia gama de aplicaciones como micas para lentes, micas de protección de luces y otros instrumentos de vehículos, con el fin de reducir costes. El principal objetivo que persiguen es proporcionar una buena calidad de transparencia en diversos componentes que puedan remplazar al vidrio, como el cristal de protección de los acuarios o los cristales de las ventanas. También son utilizados en materiales expuestos a la intemperie debido a que presenta estabilidad a la radiación UV. Los poliacrilatos también son compatibles con el tejido humano, por lo que también puede utilizarse para fabricar lentes intraoculares [14].

Algunos estudios sugieren que la adición de acrílicos como el ácido acrílico provoca mejoras en las propiedades mecánicas del compuesto base, como aumentos en la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción por división, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad [15]. Los plásticos acrílicos son bastante frágiles, pero pueden endurecerse mediante copolimerización con otro monómero, como el polibutadieno [16], o mezclándolos con un elastómero similar al poliestireno de alto impacto. Las aleaciones de acrílico y PVC

ofrecen gran resistencia al impacto, rigidez y buenas características de termoformado [17]. El copolímero de PMMA y -metil estireno proporciona una temperatura de uso superior a la del PMMA [18]. La copolimerización de metacrilato de metilo con estireno mejora el flujo de fusión. La copolimerización con ácido acrílico o metacrílico proporciona una dureza y resistencia a la abrasión superiores, pero el producto es más susceptible a los efectos de la temperatura.



**Figura 7.** Derivados el ácido acrílico y metacrílico.

### 2.3.1 Polimetilmetacrilato (PMMA).

El PMMA es uno de los polímeros amorfos que pertenecen a la familia de los acrilatos. Es un polímero transparente e incoloro con una temperatura de transición vítrea que oscila entre 100 °C y 130 °C, y una densidad de 1,20 g/cm<sup>3</sup> a temperatura ambiente. Este polímero funde a 130 °C, con una absorción de humedad en equilibrio del 0.3 al 0.33% [19].

El PMMA es uno de los polímeros con mayor resistencia a la exposición solar, ya que presenta una pequeña variación bajo el efecto de la radiación UV. Tiene muy buena

estabilidad térmica, y se sabe que soporta temperaturas desde los  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta los  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . También posee muy buenas propiedades ópticas, con un índice de refracción de 1,490, y un buen grado de compatibilidad con el tejido humano [20].

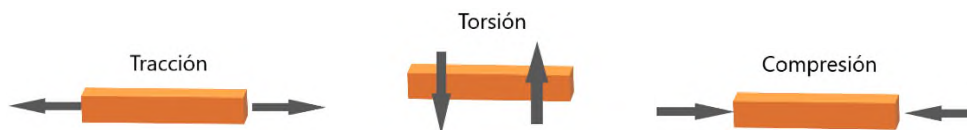
Respecto a la resistencia mecánica, el PMMA tiene un alto módulo de Young y un bajo alargamiento a la rotura. Por lo tanto, no se hace añicos al romperse, y resulta ser uno de los termoplásticos más duros con una alta resistencia al rayado. Este polímero tiene una resistencia razonable a los productos químicos, no viéndose afectado por la solución acuosa de la mayoría de los productos químicos de laboratorio. Sin embargo, tiene una baja resistencia a los hidrocarburos clorados y aromáticos, ésteres o cetonas [20].

## 2.4 Propiedades mecánicas de las películas.

El comportamiento mecánico que experimenta un material debido a la aplicación de fuerzas o cargas sobre él se le llama propiedades mecánicas del material. Estas propiedades físicas permiten distinguir un material de otro y son muy importantes para determinar la respuesta del material cuando se le aplica una fuerza determinada. Algunas propiedades mecánicas son el módulo de Young, la elasticidad máxima y la resistencia a la ruptura. El módulo de Young ( $Y$ ) es una propiedad mecánica importante que se utiliza para describir la rigidez de los materiales. Es una medida de la resistencia de un material a la deformación elástica bajo tensión o compresión. A partir de la **ecuación (1)** Se puede calcular el valor de  $Y$ .

$$Y = \frac{FL_0}{A(\Delta L)} \quad (1)$$

Donde  $F$  es la fuerza aplicada,  $L_0$  es la longitud inicial del material,  $A$  es el área del material que experimenta la fuerza y  $\Delta L$  es cambio de longitud que experimenta el material debido a la fuerza. Cuando  $\Delta L$  es muy pequeño, el material cumple la ley Hooke.



**Figura 8.** Deformación de los materiales.

La elasticidad o deformación ( $\xi$ ) de un material es la elongación que experimenta un material cuando se le aplica una fuerza en una determinada dirección. La  $\xi$  determina la relación entre las fuerzas aplicadas a los materiales y las correspondientes deformaciones. A partir de la **ecuación (2)** se determina el valor de la deformación.

$$\xi = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{F}{L_0(Ks)} \quad (2)$$

Donde  $L_0$  es la longitud inicial del material,  $\Delta L$  es el cambio de longitud del material debido a la aplicación de una fuerza ( $F$ ) y  $Ks$  es el coeficiente de rigidez del material.

La resistencia a la torsión ( $RT$ ) es otro parámetro mecánico que se refiere a la carga excéntrica de un miembro estructural que tiende a torcerlo, es decir, se genera esfuerzo cortante y se crea una deflexión torsional. La determinación del valor de  $RTs$  se obtiene a partir de la **ecuación (3)**.

$$RT = \frac{FL}{Ad} = \frac{E}{\emptyset} \quad (3)$$

Donde  $F$  es la fuerza aplicada al material,  $L$  es longitud inicial,  $A$  es el área aplicada al material,  $d$  es la distancia que se desplazó con respecto a la longitud inicial,  $E$  es el esfuerzo aplicado al material y  $\emptyset$  es el ángulo de deformación. La caracterización de las propiedades mecánicas del material es muy importante para definir sus aplicaciones o usos del almidón modificado [21].

### 3 ANTECEDENTES

En la literatura hasta el momento no se ha reportado trabajos de la combinación del almidón con hule y acrílico. Sin embargo, hay trabajos de investigación relacionados con la combinación de almidón con hule, almidón con acrílico y hule acrílico, algunas de las investigaciones son las siguientes.

En 2003 Carvalho y col. [22] realizaron una mezcla de almidón de maíz con látex, el cual se obtuvo directamente del árbol de hule. Ellos variaron el contenido de látex en las mezclas en un rango de 2.5-20%, además utilizaron glicerol como plastificante, sus resultados revelaron una disminución del módulo y de la resistencia a la tracción, provocando que las películas obtenidas sean menos quebradizas que las de almidón nativo. También ellos observaron que la separación de fases de algunas formulaciones dependía de la cantidad de látex y glicerol, además la presencia de componentes no gomosos presentes en el látex no solo aseguraba la estabilidad del látex, también eran responsables de mejorar la compatibilidad entre el almidón y el hule natural presente en el látex. Por último, concluyeron que el glicerol contribuía a la plasticidad del almidón y a la mejora de la interface almidón-caucho.

En el 2006 Shey y col. [23], publicaron un artículo donde analizaban la producción de productos de espuma utilizando diferentes almidones nativos y látex como agente espumante. Los resultados mostraron que la adición de látex mejora la flexibilidad de los productos de espuma, pero a su vez disminuye el índice de fluidez. Observaron que la densidad de los productos de espuma aumenta con el incremento del contenido de látex, y la adición de  $\text{CaCO}_3$  disminuye el contenido de humedad de los productos de espuma. Ellos también analizaron el efecto de los estabilizadores de látex en las propiedades de los

productos de espuma. Sus resultados sugieren que las propiedades de los productos de espuma pueden "afinarse" utilizando diferentes almidones y concentraciones variables de látex y  $\text{CaCO}_3$ . Estos resultados también ponen de relieve la importancia de los estabilizadores del látex para evitar la coagulación del látex en la masa. Además, esta información puede utilizarse para optimizar el proceso de producción y mejorar la calidad de los productos de espuma a base de almidón.

En 2010 Valodkar y col. [24], publicaron un artículo donde analizaron el uso de nanopartículas de almidón como posible sustituto del negro de humo como relleno en compuestos de hule natural. Los investigadores prepararon nanocompuestos de caucho natural con distintos rellenos a base de almidón y evaluaron sus propiedades termomecánicas, morfología, estabilidad térmica y sorción de agua. El estudio descubrió que la adición de solamente 10 phr (partes por cien de caucho) de nanocristales de almidón en caucho natural inducía un efecto de refuerzo correspondiente a más de 20 phr de negro de humo. Los nanocompuestos resultantes mostraron propiedades termomecánicas mejoradas, con tracción y elongación incluso superiores a las de los compuestos convencionales de almidón y negro de humo sin tratar. Los nanocompuestos también mostraron una morfología monofásica uniforme con una superficie lisa y estabilidad térmica hasta 250 °C. La sorción de agua fue menor de lo que esperaban y disminuyó con el aumento del relleno, lo que indica una mayor adhesión entre la matriz polimérica y el relleno. El estudio sugiere que el almidón podría ser un sustituto potencial del negro de humo como relleno en los compuestos de caucho.

Cai y col. [25], en el 2021 usaron en la elaboración de películas de almidón de papa, caucho y caucho epoxidado, como modificadores potenciales del almidón de termoplástico. Ellos disminuyeron la resistencia a la tracción y al aumento de la elasticidad de las películas de almidón. Además, las películas presentaron biodegradación.

Sowińska-Baranowska y col. [26], en 2022 utilizaron almidón de maíz como bio-relleno en caucho natural (NR) mejorando sus propiedades mecánicas, funcionales y de entrecruzamiento.

También se han realizado mezclas de almidón y acrílicos, en 2020 Czarnecka y col. [27], publicaron un artículo donde analizó la síntesis y caracterización de polímeros superabsorbentes y biodegradables (SAP), basados en almidón y ácido acrílico. Ellos sintetizaron nueve formulaciones de SAP diferentes utilizando diversas rutas sintéticas y los caracterizaron estructural y fisicoquímicamente. La parte más importante de la caracterización fue la determinación de las características de hinchamiento en agua y fluidos corporales artificiales, lo cual tiene especial interés desde el punto de vista de su posible aplicación como absorbente para productos de higiene personal. Los SAP también presentaban excelentes propiedades mecánicas como alta resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura, lo que los hace adecuados para su uso en aplicaciones que requieren alta estabilidad mecánica. Además, los SAP resultaron ser biodegradables, una característica importante para los materiales respetuosos con el medio ambiente. En conjunto, los SAP basados en almidón y ácido acrílico mostraron propiedades y características prometedoras para aplicaciones potenciales en diversos campos.

Otro estudio sobre la síntesis de un compuesto basado en almidón y poliacrilatos es el publicado por Zhu y col, en 2021 [28]. Los autores realizaron un estudio sobre la síntesis y caracterización de un material compuesto de almidón y copolímero de poli(ácido acrílico-acrilamida) para la adsorción de iones de mercurio (II) en agua. Ellos observaron que el material compuesto presentaba buenas propiedades de adsorción para concentraciones bajas de iones de mercurio (II) y podía ser posible su aplicación en el tratamiento de aguas residuales. El artículo explora los efectos del tiempo de contacto, el valor de pH, la

concentración inicial de iones Hg (II) y la temperatura de tratamiento sobre la capacidad de adsorción. Los autores discuten varios métodos para eliminar el mercurio del agua, incluyendo el uso de hidrogeles de poli(ácido acrílico), adsorbentes magnéticos y carbón activado, esto con el fin de comparar las propiedades y características de estos materiales con las del material sintetizado. Ellos encontraron que después de 120 min de interacción, el compuesto de poli(ácido acrílico-acrilamida/almidón) alcanzó la máxima capacidad de adsorción de 19,23 mg/g de iones Hg(II) tomando en cuenta que la concentración inicial de 15 mg/L , pH de 5,5 a 45 °C. En comparación con otros estudios con el mismo propósito, los composites sintetizados en este estudio presentan altas propiedades de adsorción para el ion Hg(II) en solución diluida.

En base a todo lo anterior, hasta el momento no se ha reportado en la literatura la elaboración películas de almidón/hule/acrílico utilizando almidón de plátano macho como matriz polimérica.

## 4 JUSTIFICACIÓN

El uso de películas compuestas a base de solo almidón presenta desventajas con respecto a los plásticos convencionales (los cuales son no biodegradables) debido a que presentan afinidad por el agua y sus películas son quebradizas. Hasta el momento no se han reportado trabajos en la literatura que aborden específicamente la mejora de estas desventajas mediante mezclas físicas de almidón con caucho natural y acrílicos como reforzantes.

En este proyecto se elaboraron y caracterizaron películas de almidón con caucho natural y acrílicos. Para esto, se utilizó almidón de plátano macho, el cual es un almidón no convencional. Este almidón es cosechado en la cuenca del Papaloapan durante todas las estaciones del año, por lo cual, lo convierte en una materia prima local y sostenible. Aunado a lo anterior, la extracción de este almidón es fácil y de bajo costo. El caucho natural se extrajo a partir del látex obtenido de árboles de hule que se encuentran dentro de la Universidad del Papaloapan y en cuanto al acrílico se adquirió comercialmente (a un precio económico).

## **5 HIPÓTESIS**

La rigidez e hidrofiliidad de las películas de almidón nativo disminuirán con la adición de caucho y acrílicos a la formulación de estas.

## **6 OBJETIVOS**

### **6.1 Objetivo General**

- Elaborar y caracterizar parcialmente películas de almidón/caucho/acrílico.

### **6.2 Objetivos particulares.**

1. Aislar el almidón de plátano macho.
2. Caracterizar la materia prima (FTIR, DSC, TGA) que se va a utilizar en la elaboración de las películas.
3. Determinar la formulación adecuada de las películas de almidón-caucho-acrílico mediante la variación de los componentes de la misma.
4. Caracterizar las películas elaboradas por técnicas instrumentales (FTIR, TGA, DSC)
5. Determinar las propiedades mecánicas de las películas obtenidas.
6. Proponer un uso de las películas obtenidas.

## 7 PARTE EXPERIMENTAL

### 7.1 Materiales

**Líquido acrílico (Monomero).** Etil metacrilato grado comercial.

**Polvo acrílico (Activador).** Polietilmetacrilato, Polimetilmetacrilato, grado comercial.

**Plastificante.** Glicerol 99% de pureza, número de catálogo 17904, marca ThermoFisher Scientific.

### 7.2 Extracción almidón

Se extrajo el almidón utilizando el método de Flores-Gorosquieta y colaboradores [29], el cual consistió en pelar el plátano en rodajas para depositarlas en una solución al 0.3% (p/v) de ácido cítrico, posteriormente, estas se molieron y se tamizaron por las mallas No. 40(0.425mm), 100 (0.15mm) y 270 (0.053mm), el producto obtenido se dejó secar por 24h, finalmente se molieron nuevamente y se tamizo por las mallas No. 40 (0.425mm), 100 (0.15mm) y 270 (0.053mm). La determinación de la composición química del almidón se realizó de acuerdo con el procedimiento de la Asociación Oficial de Químicos Analíticos (AOAC de sus siglas en ingles Association of Official Analytical Chemists) (2003) [30], y la determinación de amilosa se utilizó el método reportado por Hoover & Ratnayake (2002) [31] y Aparicio y colaboradores (2014) [32].

### 7.3 Extracción del látex.

Selección de árboles: Se seleccionaron árboles de hule que tengan un diámetro de tronco adecuado y que estén en buenas condiciones. Se eligieron árboles con al menos 6 años de vida y un diámetro de tronco de 20-25 cm.

Preparación del árbol: Se limpió la corteza del árbol en un área de aproximadamente 30 cm alrededor del área de tala. Se utilizó un cuchillo especial de corte en V para hacer una incisión poco profunda en el tronco, en un ángulo de aproximadamente 30 grados con respecto al suelo. Las incisiones tuvieron una longitud aproximada de 2.5 a 5 cm y un ancho de 0,6 a 1,3 cm, se colocó una canaleta para dirigir el flujo del látex a un cubo de plástico para su posterior recolección.

Recolección del látex: Después de un aproximado de 30 minutos de haber hecho las incisiones a la corteza, se recolectó el látex acumulado y se vació en un vaso de precipitados para su posterior uso.

Procesamiento del látex: El látex recolectado se añadió mezcla de almidón nativo y acrílicos para la elaboración de las películas.

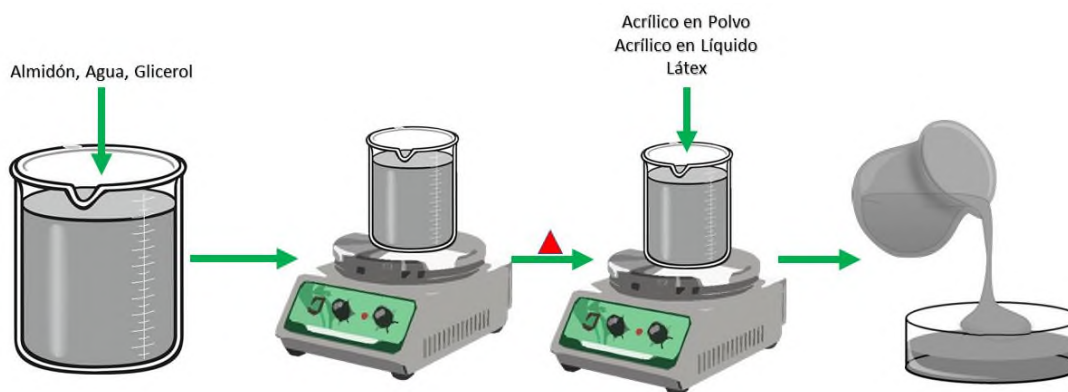
## 8 METODOLOGÍA

### 8.1 Elaboración de las películas

En la **Tabla 2**, se muestran las formulaciones que se usaron de cada compuesto para la elaboración de las películas. En la **Figura 8** se ilustra de manera general el procedimiento que se llevó a cabo para la formación de las películas de almidón de plátano macho/hule/acrílicos. Las proporciones que se utilizaron se basan en estudio de Ramírez-Hernández y col. [33], en donde realizaron una optimización de las condiciones de proceso en la fabricación de películas de almidón de plátano macho y caucho natural. Las proporciones de acrílicos (polvo/liquido) que se utilizaron fueron de 1:1. Además, se agregó glicerol como plastificante en proporción 1:2 (glicerol/almidón)

**Tabla 2.** Proporciones para la elaboración de las películas de almidón/hule/acrílicos

Película	Almidón (% masa)	Hule (% masa)	Acrílicos (mg)
A	50	50	53
B	60	40	53
C	70	30	53
D	80	20	53
E	100	0	0
F	0	100	0



**Figura 9.** Elaboración de las películas por el método casting.

## 8.2 Caracterización

### 8.2.1 Espectrometría infrarroja con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR)

Esta técnica consiste en hacer incidir la radiación infrarroja a la muestra provocando que los enlaces químicos que hay en ella empiecen a vibrar o moverse dependiendo de la longitud de onda de la luz incidente. Esta vibración queda capturada en un dispositivo para generar el llamado espectro de infrarrojo. Este espectro se divide en tres zonas, cercano, mediano y lejano, dependiendo de su cercanía con el espectro de la luz visible. En la región del mediano se observa la mayoría de las vibraciones de los grupos funcionales orgánicos, esta región abarca el intervalo de número de onda desde  $4000$  a  $400\text{ cm}^{-1}$ . Esta técnica instrumental es muy utilizada en las caracterizaciones de los materiales ya que permite identificar de manera cualitativa los grupos funcionales presentes en ellos. En el caso del almidón y sus modificaciones, ha sido utilizada para confirmar la presencia de los componentes resultantes de la modificación química [34]. En este estudio permitió la identificación de los grupos funcionales de manera cualitativa presentes en los reactantes.

### **8.2.2 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)**

La calorimetría diferencial de barrido, o en sus siglas en inglés differential scanning calorimetry (DSC), es una técnica que consiste en calentar una muestra y una referencia al mismo tiempo e igual temperatura, utilizando para ello resistencias de calentamiento y sensores de alta sensibilidad (por ejemplo, de platino) al cambio de temperatura. El comportamiento de la absorción del calor de la muestra frente a la temperatura queda registrado en una representación llamado termograma. Con esta técnica es posible ver transiciones de fase (por ejemplo, de sólido a líquido), temperaturas de degradación y de oxidación, determinación de la capacidad calorífica ( $C_p$ ) y de la entalpía del cambio de fase, por mencionar algunas caracterizaciones térmicas [35]. En el caso del almidón fue utilizada para determinar la temperatura de gelatinización y retrogradación del almidón, por citar algunos ejemplos [36].

### **8.2.3 Análisis termogravimétrico (TGA)**

Esta técnica consiste en el comportamiento térmico de la muestra con respecto a su masa, es decir, la muestra se calienta a una determinada temperatura y se registra en un termograma el efecto que tiene esta sobre su masa. Esta técnica de caracterización permite llevar a cabo estudios cinéticos de descomposición de los materiales, determinar temperatura de degradación, entre otros. En el caso del almidón, se ha utilizado para determinar su temperatura de descomposición y su variación [37]. En esta investigación esta técnica permitió determinar la temperatura de degradación de los reactantes y del producto obtenido.

#### **8.2.4 Análisis de difracción de rayos X (DRX).**

Por sus siglas en inglés X-Ray Diffraction (XRD), consiste en hacer interaccionar un material sólido cristalino con un haz de rayos X de una determinada longitud de onda. El material cristalino dispersa al haz en determinadas direcciones del espacio de acuerdo con la ley de Bragg. Esta técnica es utilizada para caracterizar los cambios en la cristalinidad de materiales [38]. En esta investigación permitió analizar el efecto en la cristalinidad del almidón debido a su modificación química.

#### **8.2.5 Hidrolisis acuosa de las películas.**

La degradación de las películas se realizó por hidrólisis acuosa. Esta se realizó midiendo la pérdida en masa de las películas, primeramente, se pesaron 0.2 g de película, posteriormente se colocaron en un recipiente con 10 mL de agua destilada, y se dejaron embebidas por 90 días. Para determinar el porcentaje de degradación se utilizó la relación entre la masa inicial y la masa final de las películas, y fue calculado de la siguiente manera:

$$\% \text{ Masa degradada} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

**Ecuación 2**

Donde;  $m_f$  es la masa recuperada,  $m_i$  es la masa inicial de la muestra de la película.

## 9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

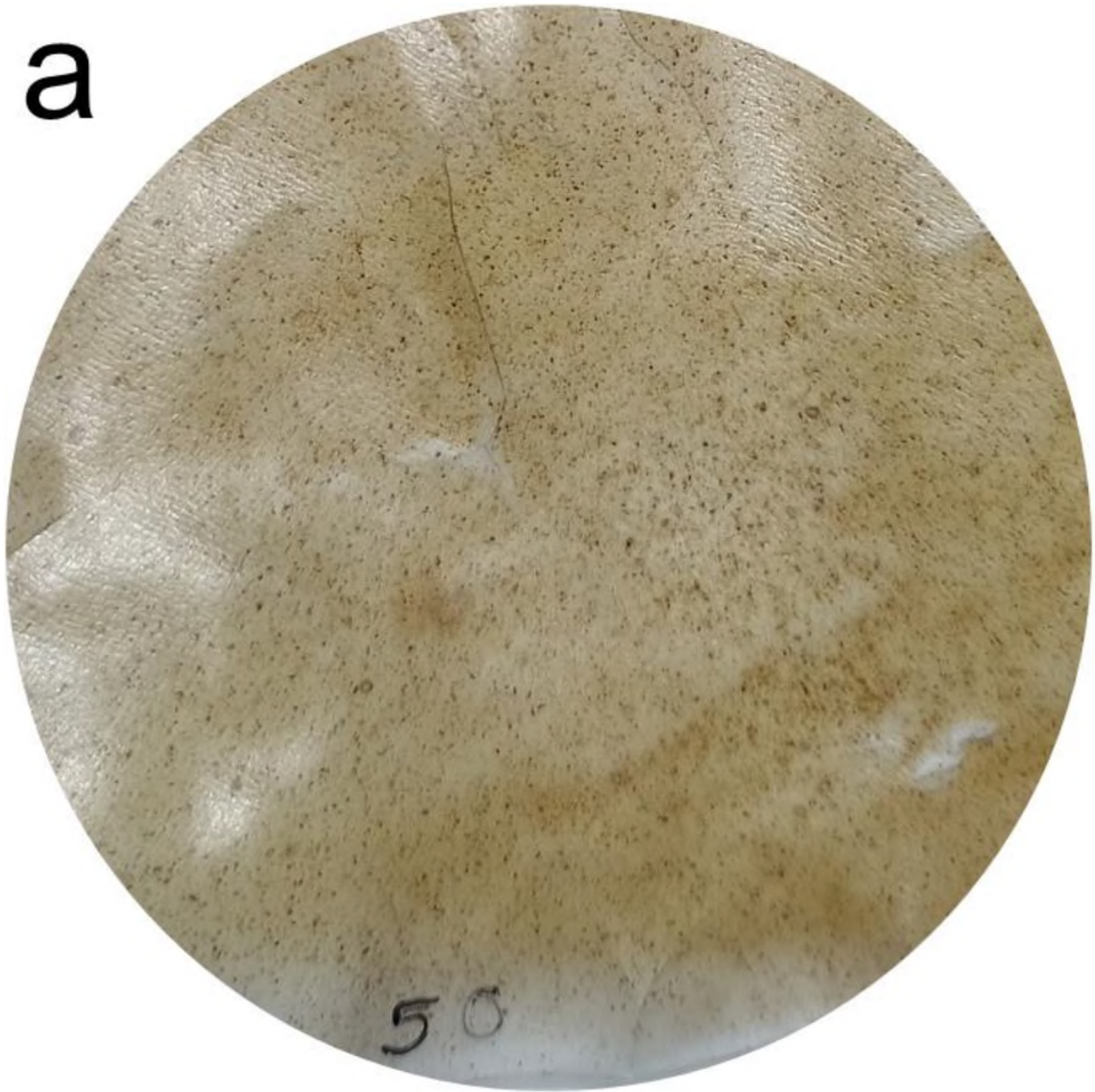
### 9.1 Aislamiento del almidón.

Se llevó a cabo la extracción del almidón de plátano macho de acuerdo con la metodología propuesta Flores-Gorosquera [29], se determinó la composición química de este y se encontró que esta fuente de almidón contenía 3.83% de humedad, 0.36% de lípidos, 2.94% de proteínas y 2.17% de cenizas. En cuanto al contenido de humedad en la literatura se ha reportado hasta un 7.30% de humedad en este fruto, este valor es mayor al obtenido en la presente investigación, se sabe que a mayores contenidos de agua se favorece la hidrólisis del almidón, lo que nos da a entender que este almidón es más estable [39], con respecto al contenido de lípidos, en la literatura se ha reportado valores mayores al 1%, también se ha reportado que los lípidos reducen significativamente la capacidad de hinchamiento de la masa de almidón y por ende la elaboración de las películas [32] [40], en cuanto al contenido de proteínas, en la literatura se ha reportado que valores mayores al 1% de proteína son considerados altos y que podrían afectar la temperatura de gelatinización, retardando el hinchamiento y afectando su perfil de viscosidad [32], el contenido de cenizas está ligado al contenido de minerales presentes en el almidón y entre mayor sea el contenido mayor estabilidad a la degradación presentan los gránulos de almidón, en la literatura se ha reportado un contenido de 0.58%, el cual es menor al obtenido en la presente investigación [40].

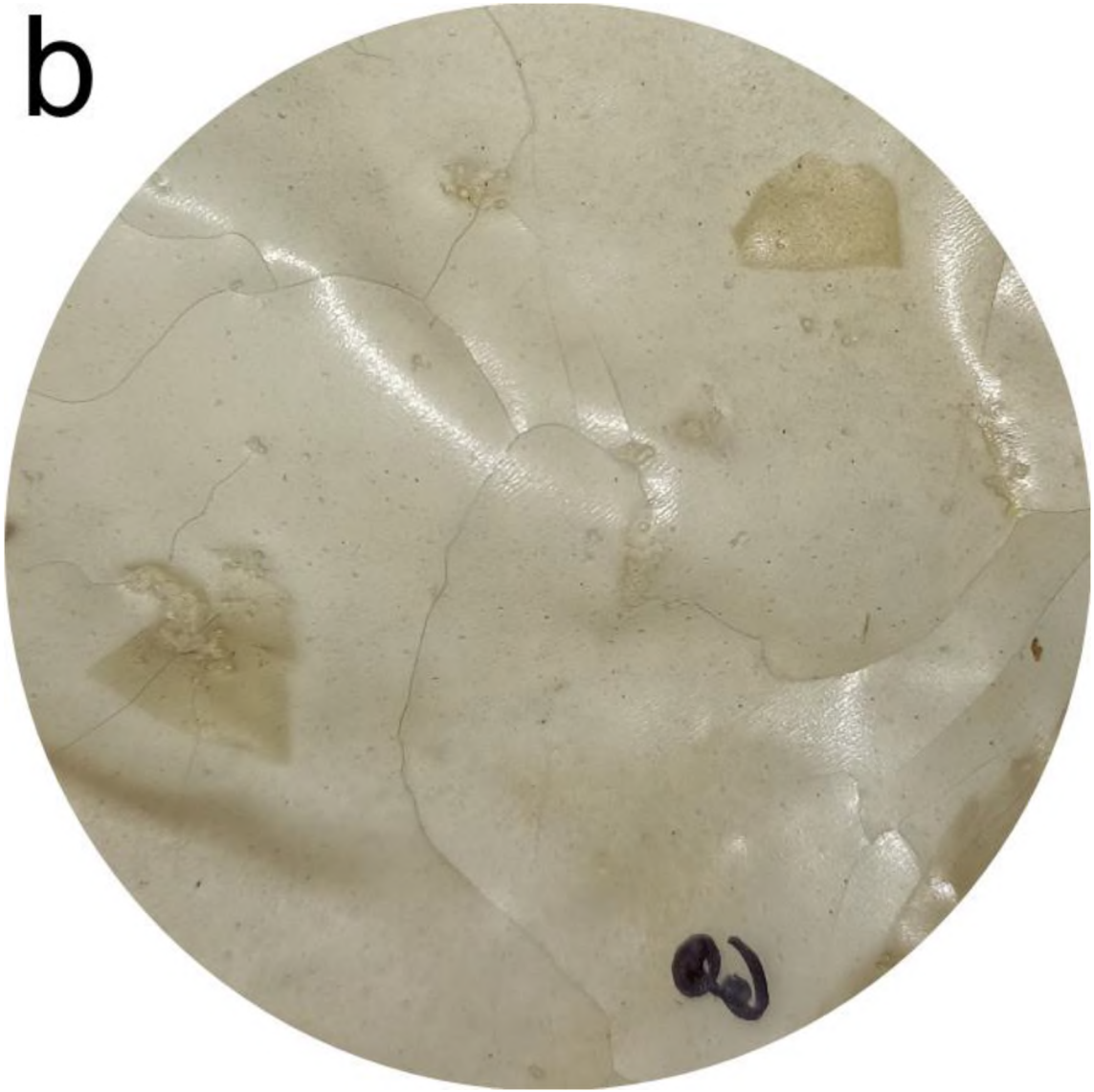
### 9.2 Elaboración de la Películas

Las siguientes imágenes presentadas en la **Figura 9** corresponden a las películas elaboradas de almidón/látex/acrílico. Las películas presentan uniformidad, destacando la película almidón/caucho/acrílico 50:50%.

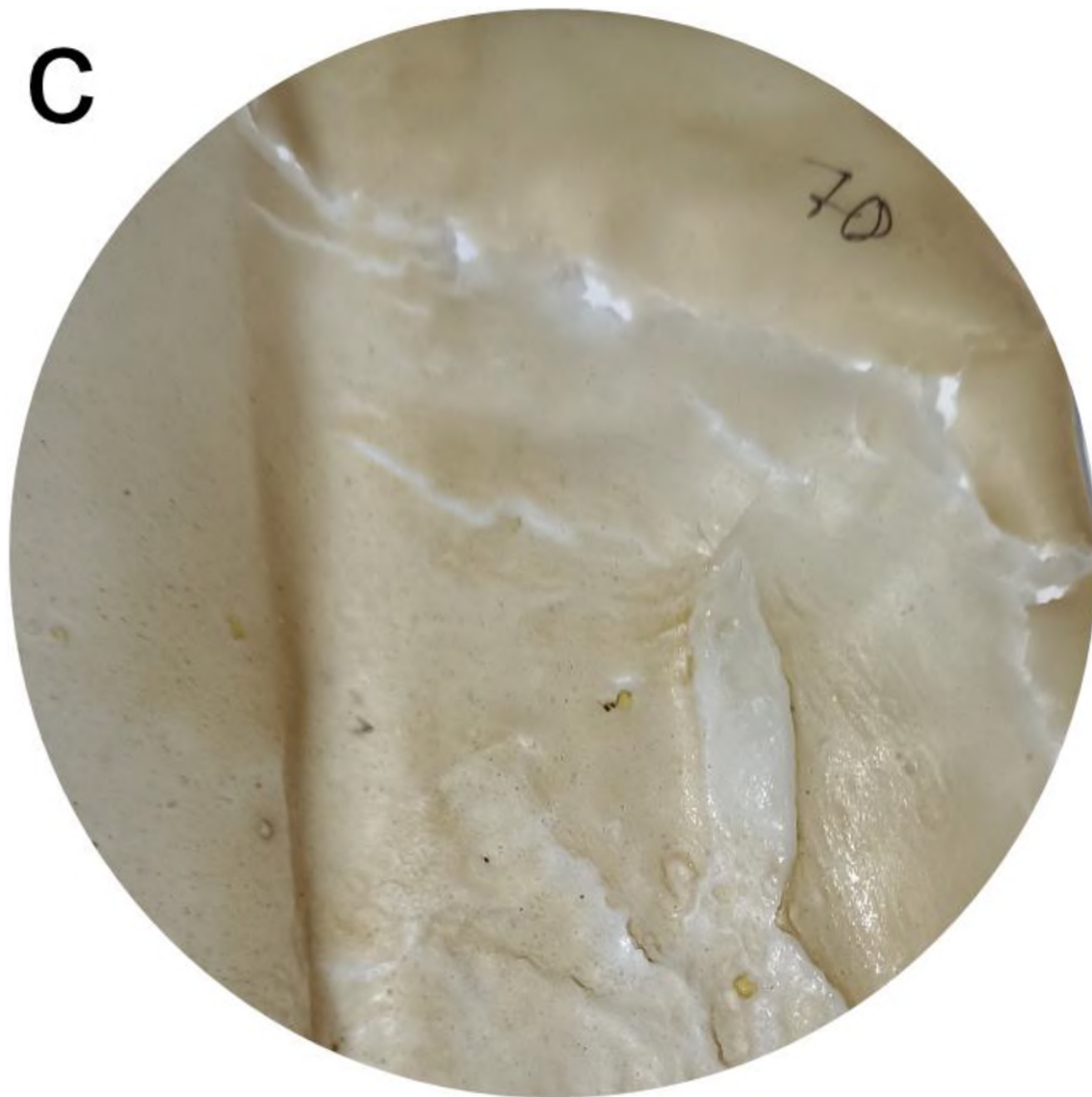
a



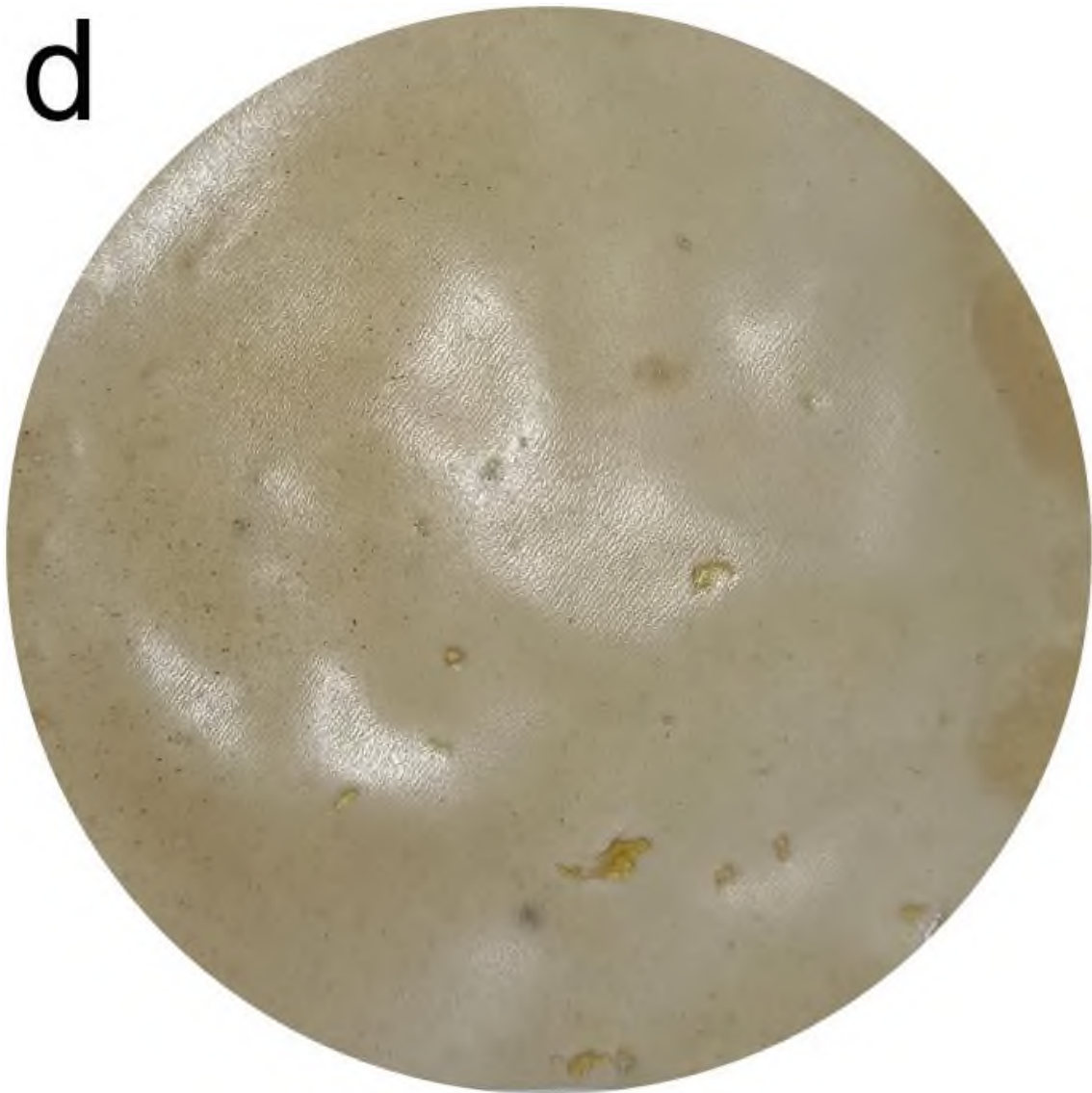
**b**



C



d



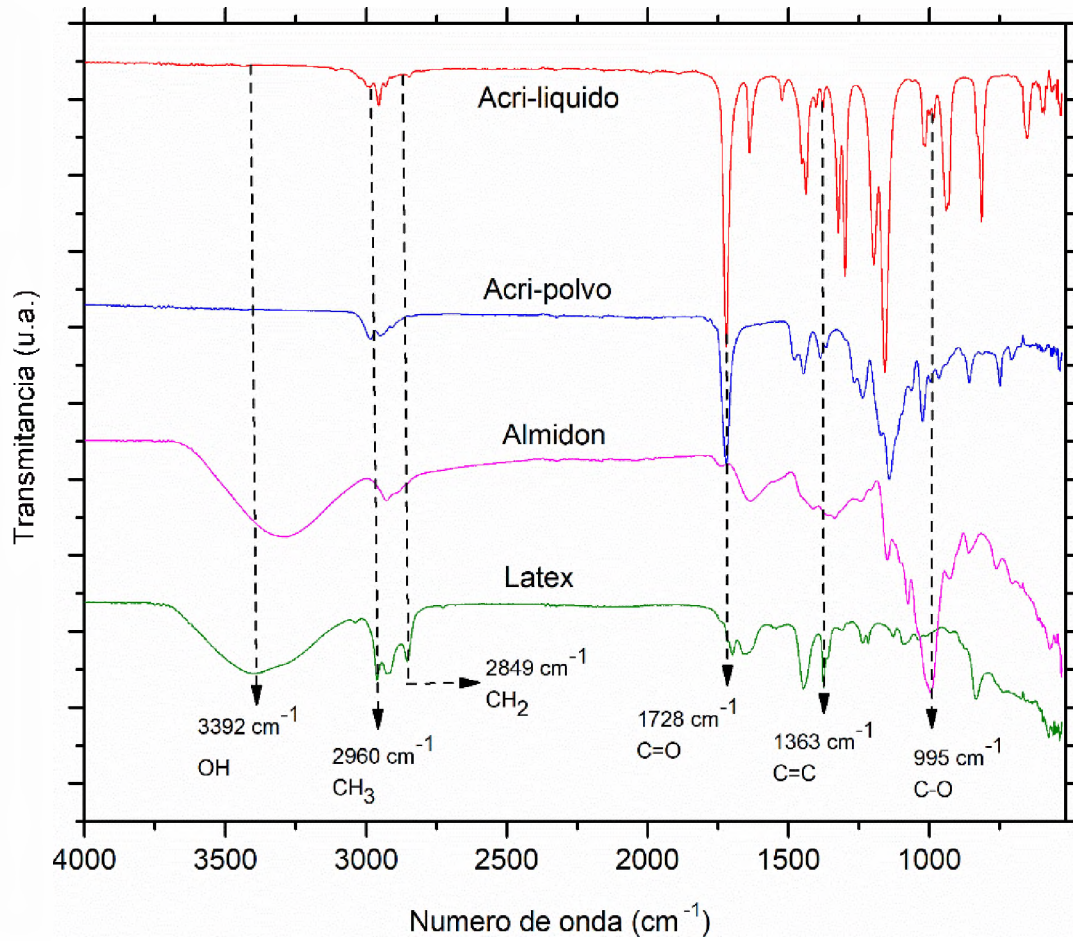
**Figura 10.** Fotos de las películas a) 50:50, b) 60:40, c) 70:30, d) 80:20.

En las películas 70:30 y 80:20 de almidón y caucho se observan cúmulos o agregados debido a la disminución de la compatibilidad de las especies químicas presentes en las películas, este resultado se espera que afecte sus propiedades fisicoquímicas.

### 9.3 Análisis por Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier.

Los espectros de infrarrojo del látex, almidón de plátano, acrílico (sólido, líquido), se presentan en la **Figura 10**. Las señales de vibración características de las sustancias mencionadas son observadas en los espectros, por ejemplo, la señal de alargamiento del grupo hidroxilo (OH) presente en el almidón y en el látex, pueden observarse en  $3392\text{ cm}^{-1}$ , aunque esta señal de vibración está desplazada a valores menores en el almidón, que, en el látex, esto se debe a que en el látex existe la presencia de agua libre. En  $2960\text{ cm}^{-1}$  y  $2849\text{ cm}^{-1}$ , se observan las señales características de los grupos metilo y metileno, respectivamente, presentes en las 4 especies químicas utilizadas en este estudio, por otra parte, la señal del grupo carbonilo presente en los acrílicos se observa en  $1728\text{ cm}^{-1}$ , esta señal solo es observada en los acrílicos. Las señales del doble enlace presentes en el látex se observan en  $1363\text{ cm}^{-1}$ , la señal del enlace carbono oxígeno se observa en  $995\text{ cm}^{-1}$ . Estos resultados son similares a los reportados en la literatura [41] [42].

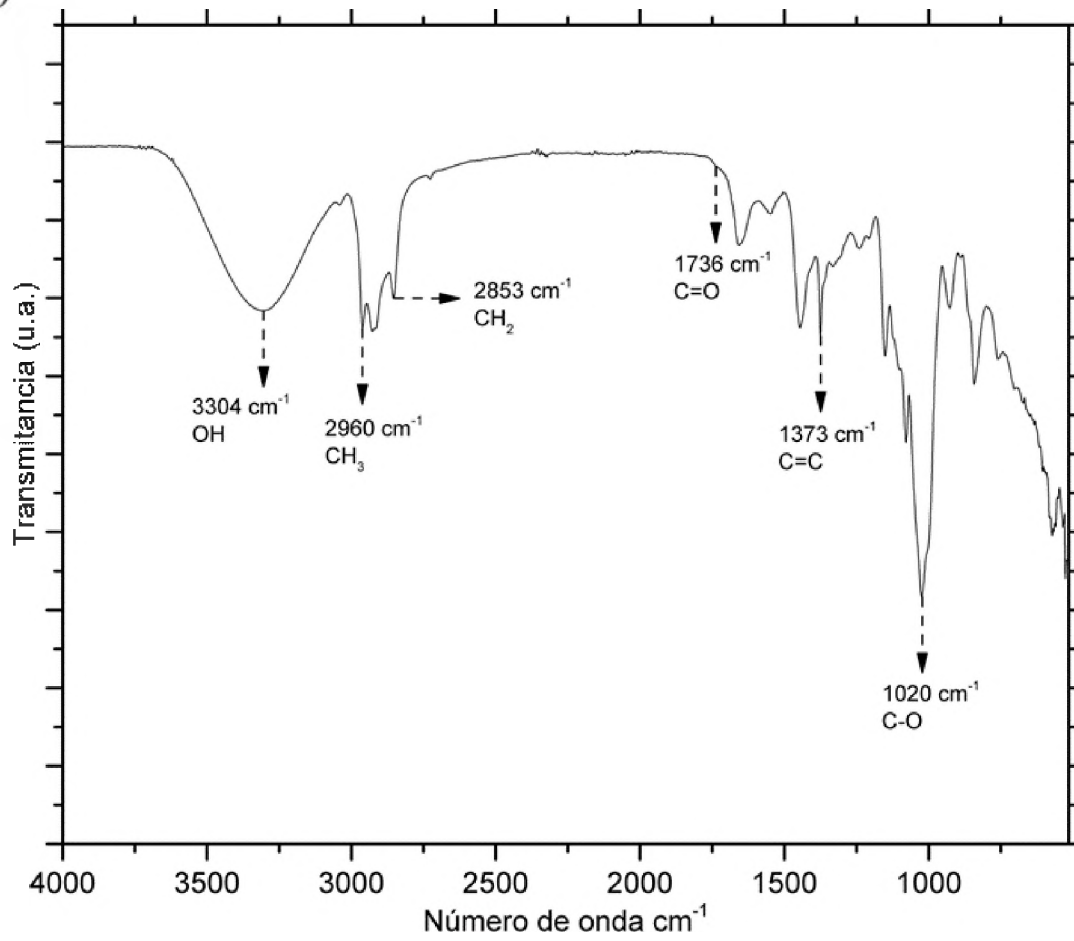
Los espectros de infrarrojo de las películas de almidón-caucho-acrílicos se presentan en la **Figura 11**.

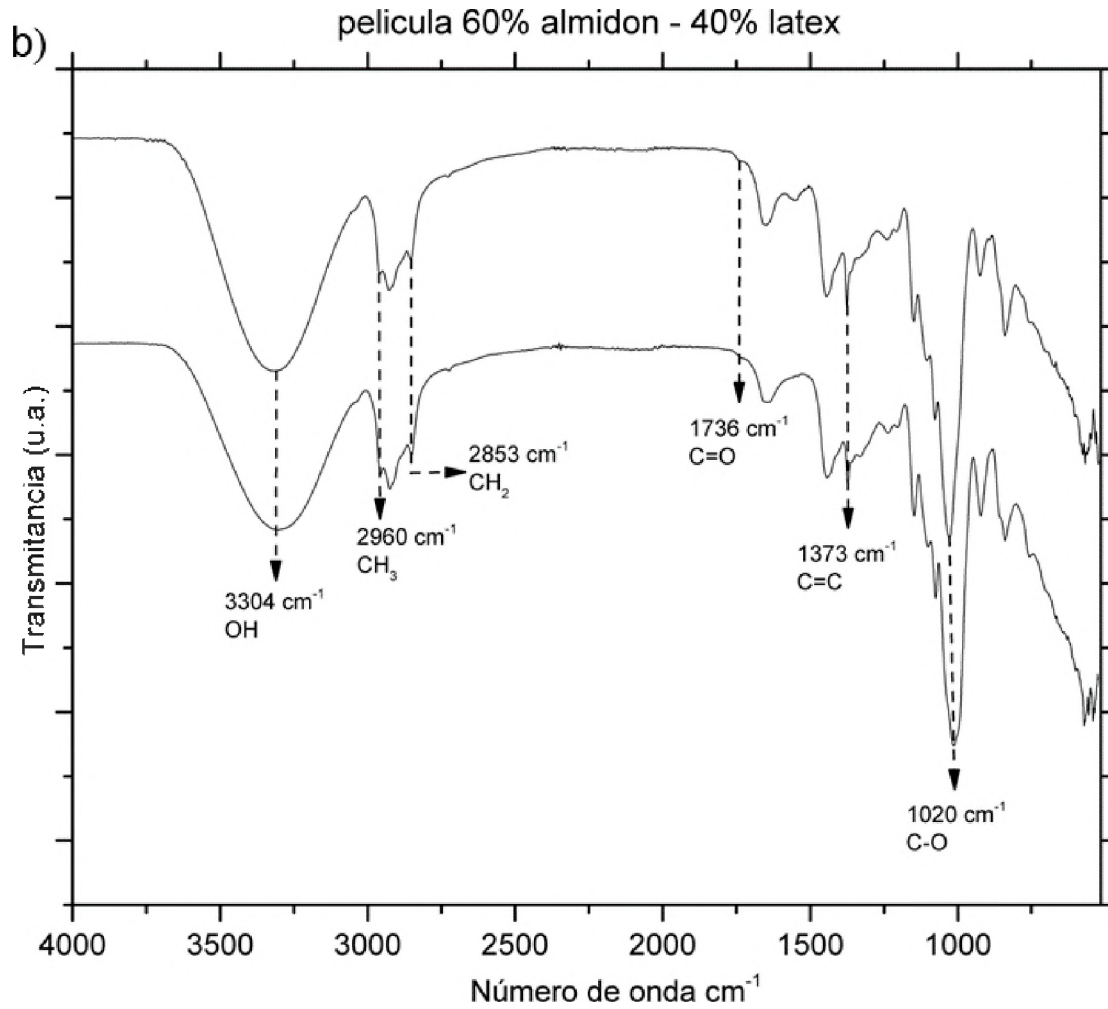


**Figura 11.** Espectros de infrarrojo del látex, almidón de plátano, acrílico (sólido, líquido).

a)

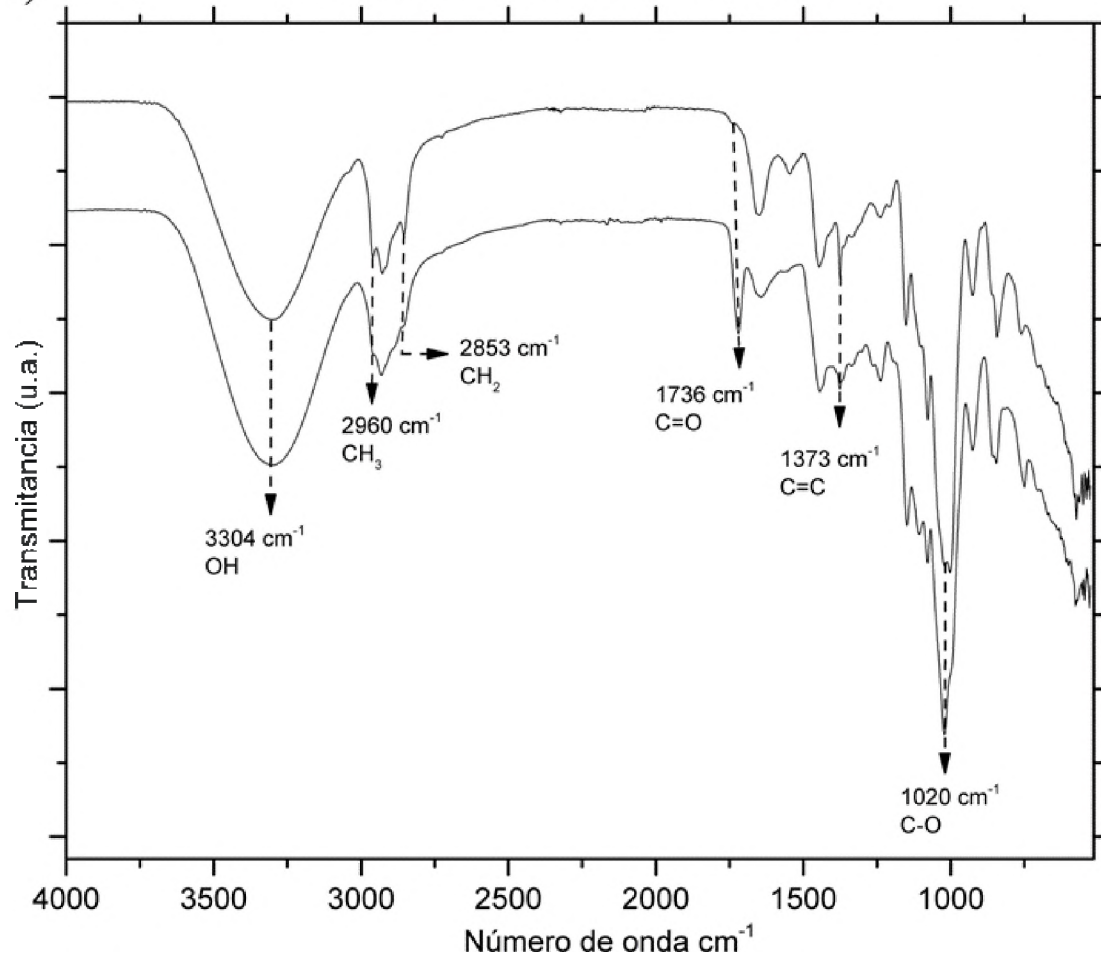
película 50% almidón - 50% latex

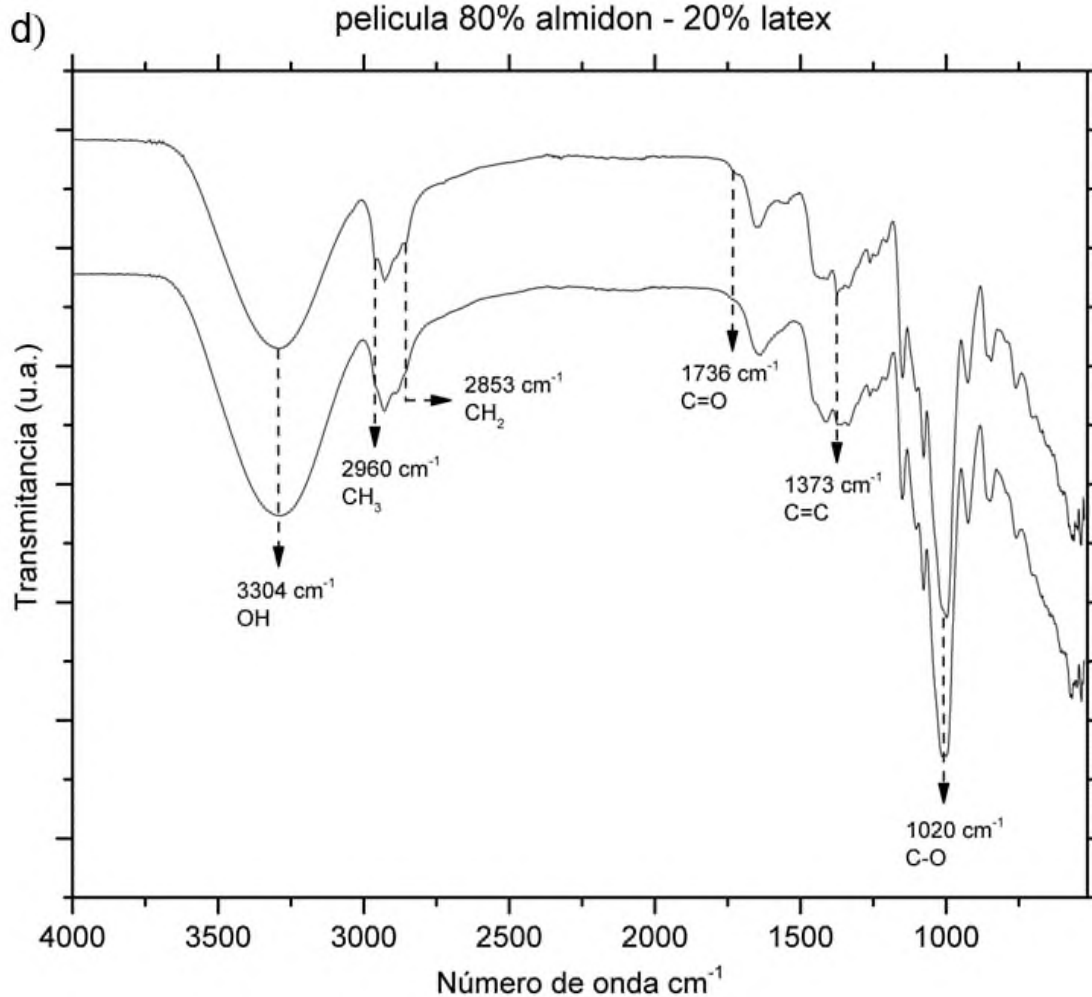




c)

película 70% almidón - 30% latex





**Figura 12.** Espectros de infrarrojo de las películas elaboradas, a) 50:50, b) 60:40, c) 70:30, d) 80:20.

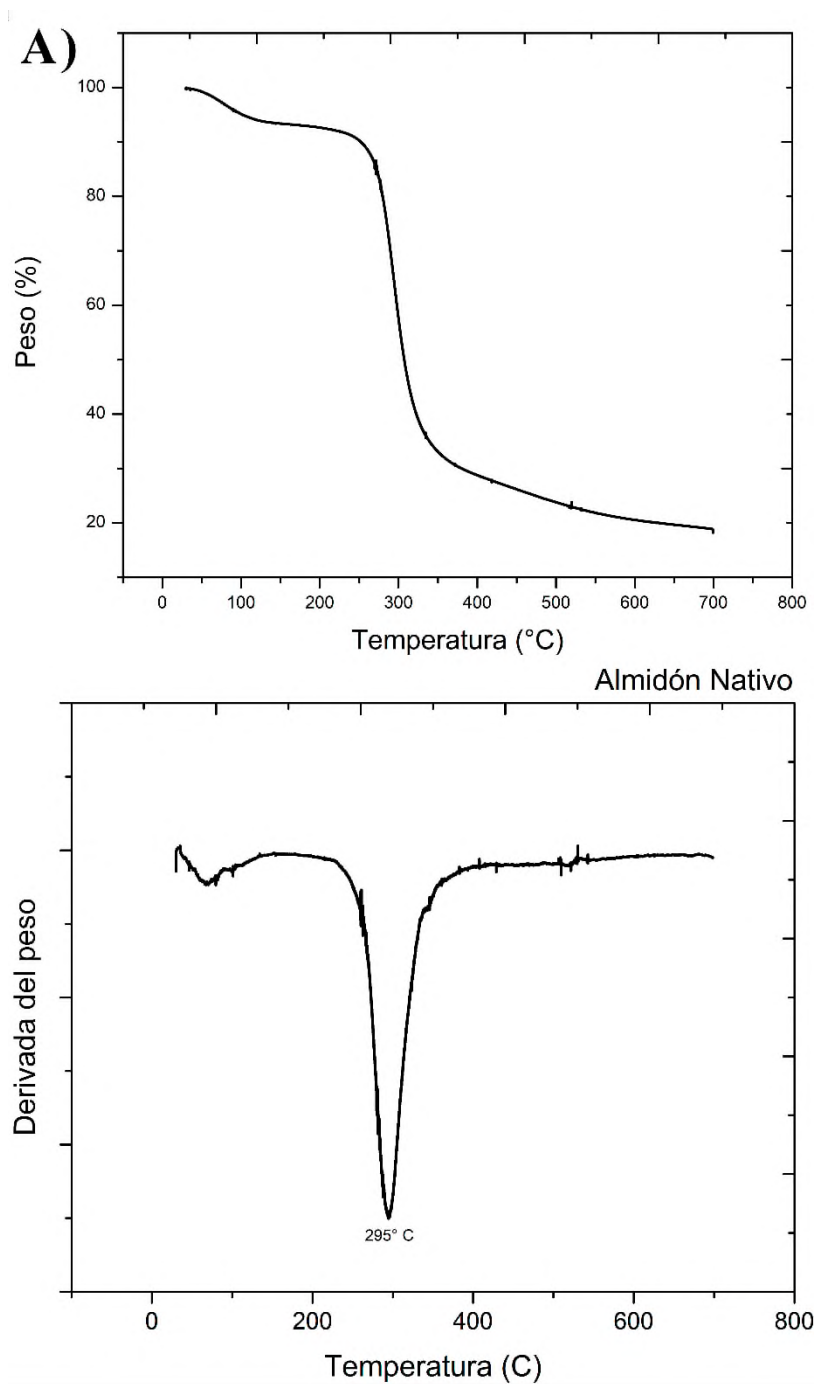
En los espectros se observa una tendencia en la señal de vibración del grupo hidroxilo (OH)  $3304 \text{ cm}^{-1}$ , la intensidad de esta aumenta conforme aumenta la proporción de almidón en la formulación de la película, esto se debe a que en la estructura del almidón, este contiene grupos hidroxilo, en comparación con el caucho que no tiene en su unidad repetitiva, por lo tanto, en la película de almidón/látex 80:20% se puede observar una mayor intensidad, caso contrario ocurre para la señal del doble enlace del presente en la estructura del caucho (1373),

se observa mejor en la formulación almidón/látex 50:50%. Ahora bien, en los espectros de las películas elaboradas también se observa la señal del grupo carbonilo en  $1736\text{ cm}^{-1}$ , característica de los acrílicos, sin embargo, esta señal se observa con poca intensidad en alguno de los espectros debido al grado de dispersión de los acrílicos en las películas, siendo la película 50:50% la de mejor distribución.

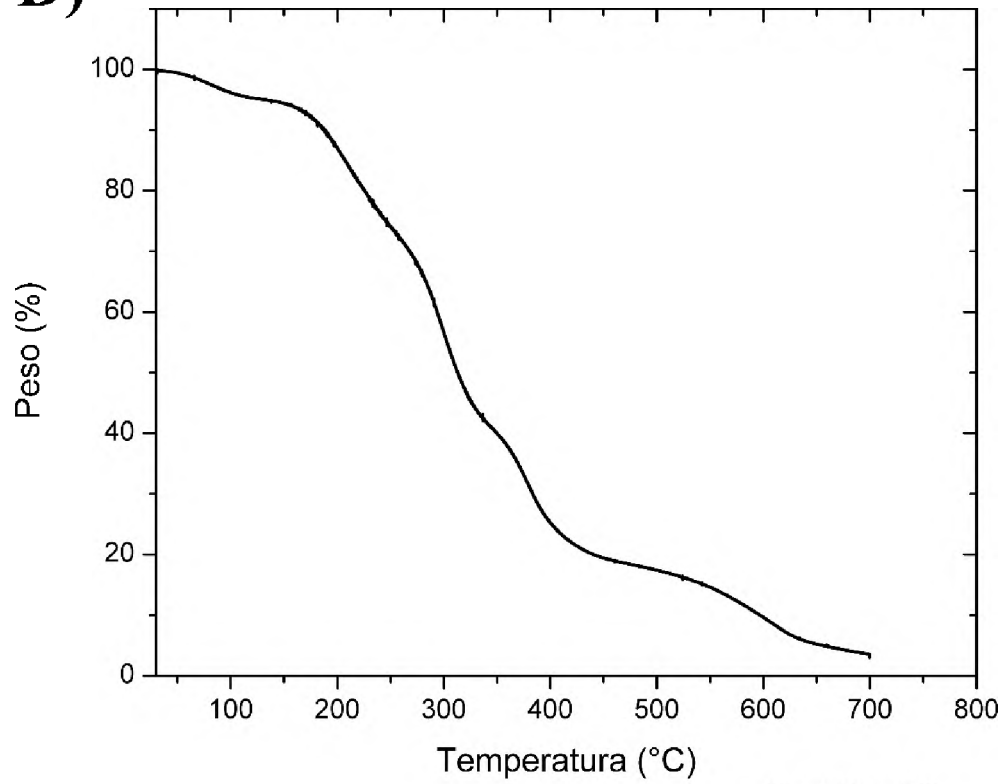
De acuerdo con los resultados obtenidos por esta técnica se puede concluir que existe la presencia de los 3 componentes utilizados como materia prima para la elaboración de las películas.

## 9.4 Análisis termogravimétrico.

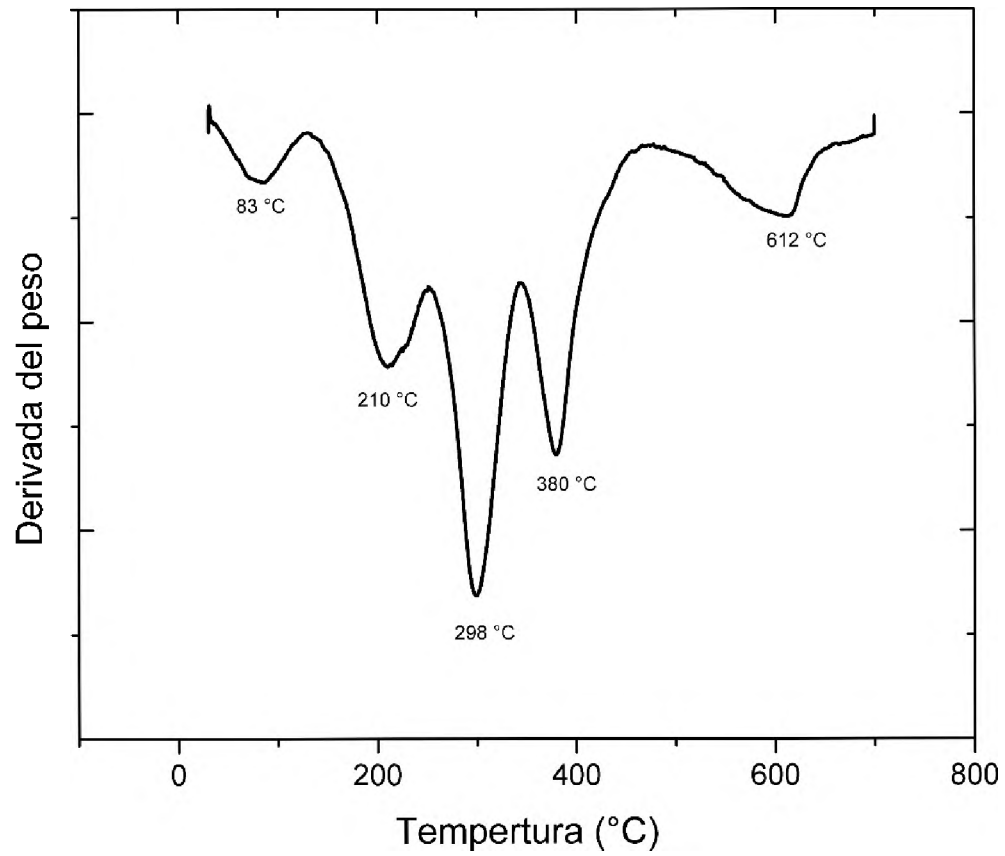
Se llevó a cabo el análisis termogravimétrico (TGA) de las películas elaboradas variando la proporción de almidón respecto a la del caucho natural. Los termogramas de TGA de las películas se presentan en la **Figura 12**.



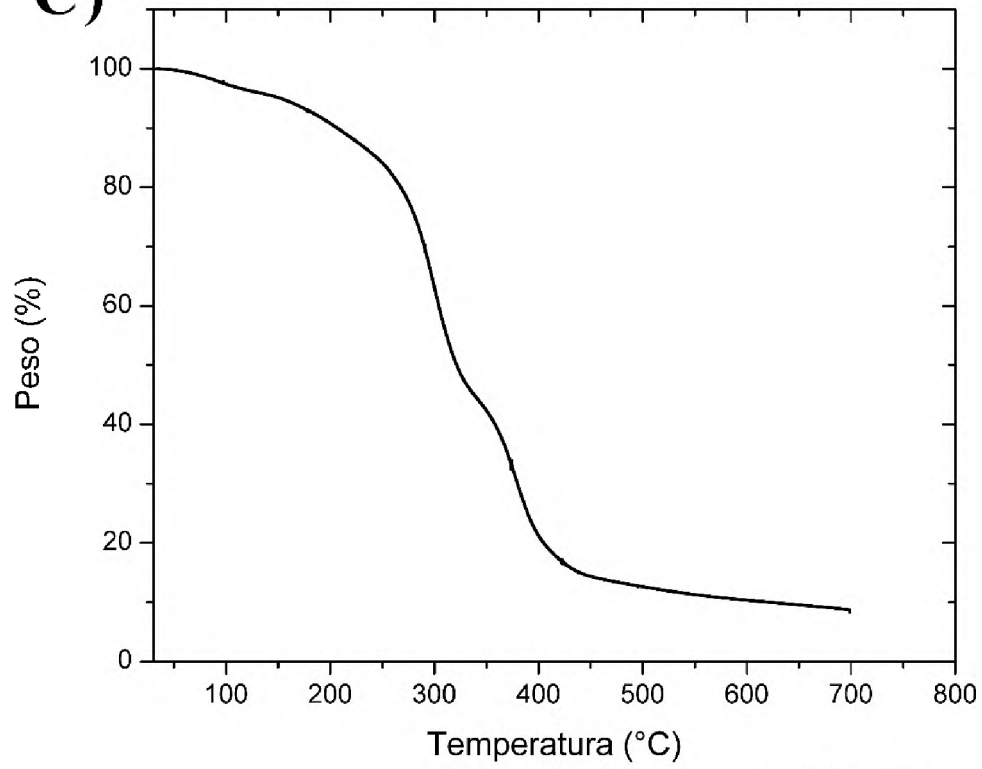
**B)**



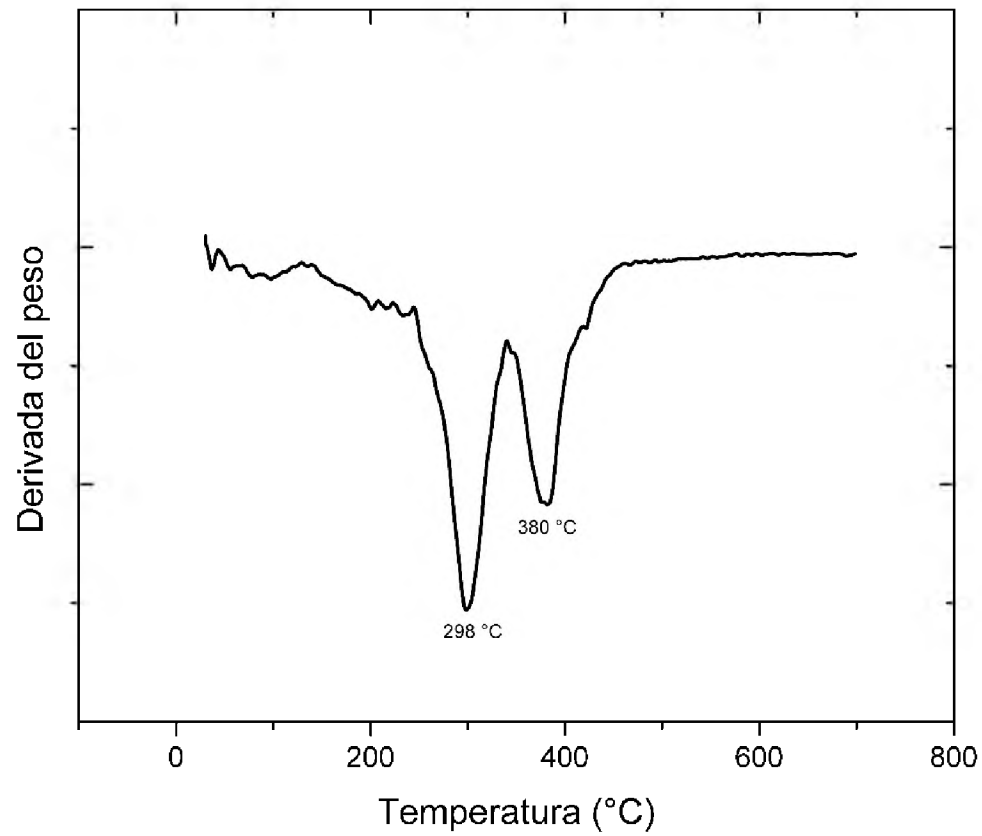
Almidón 50



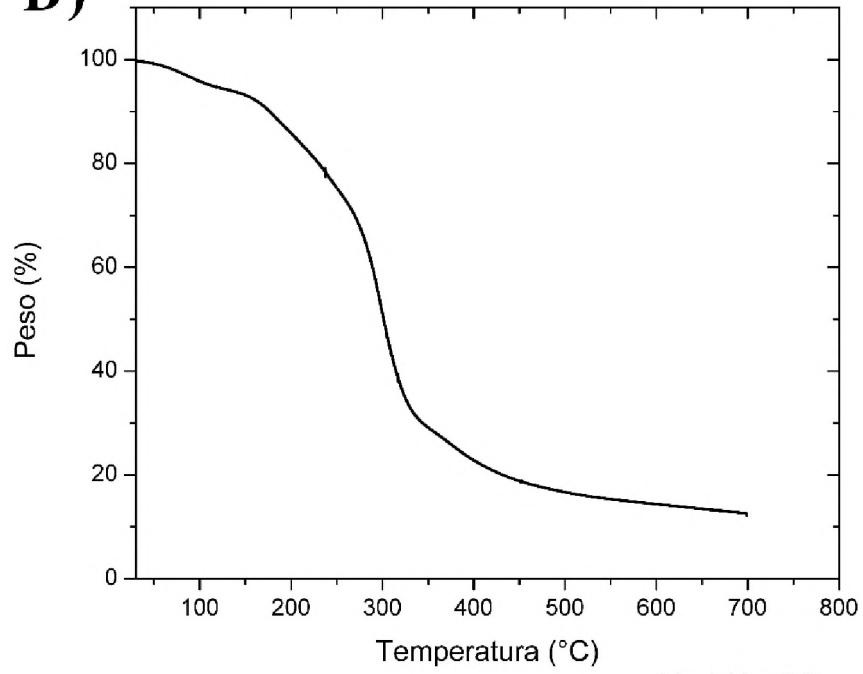
C)



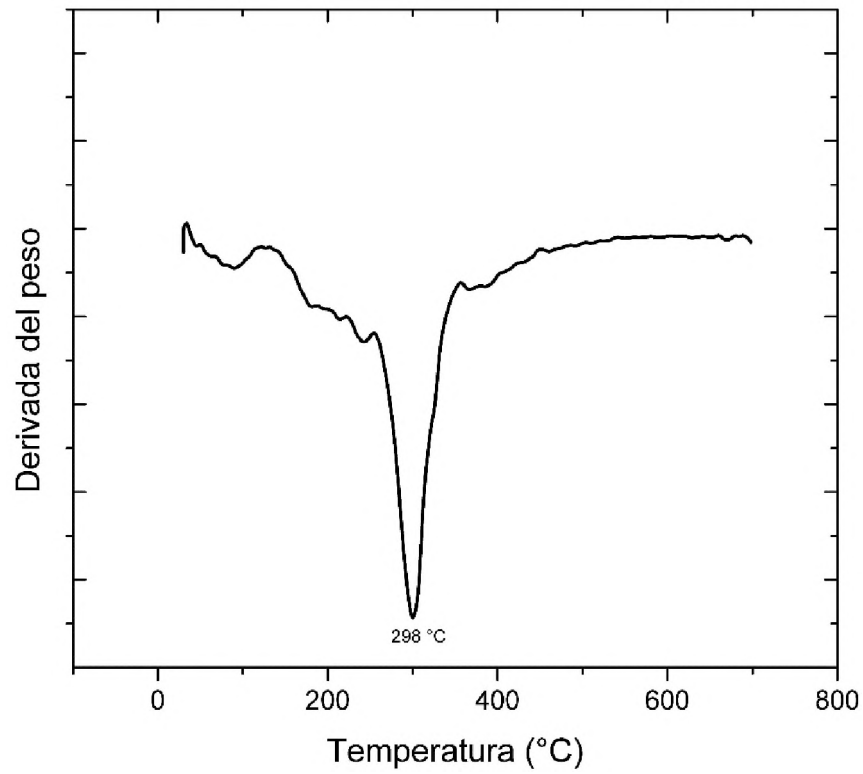
Almidón 60

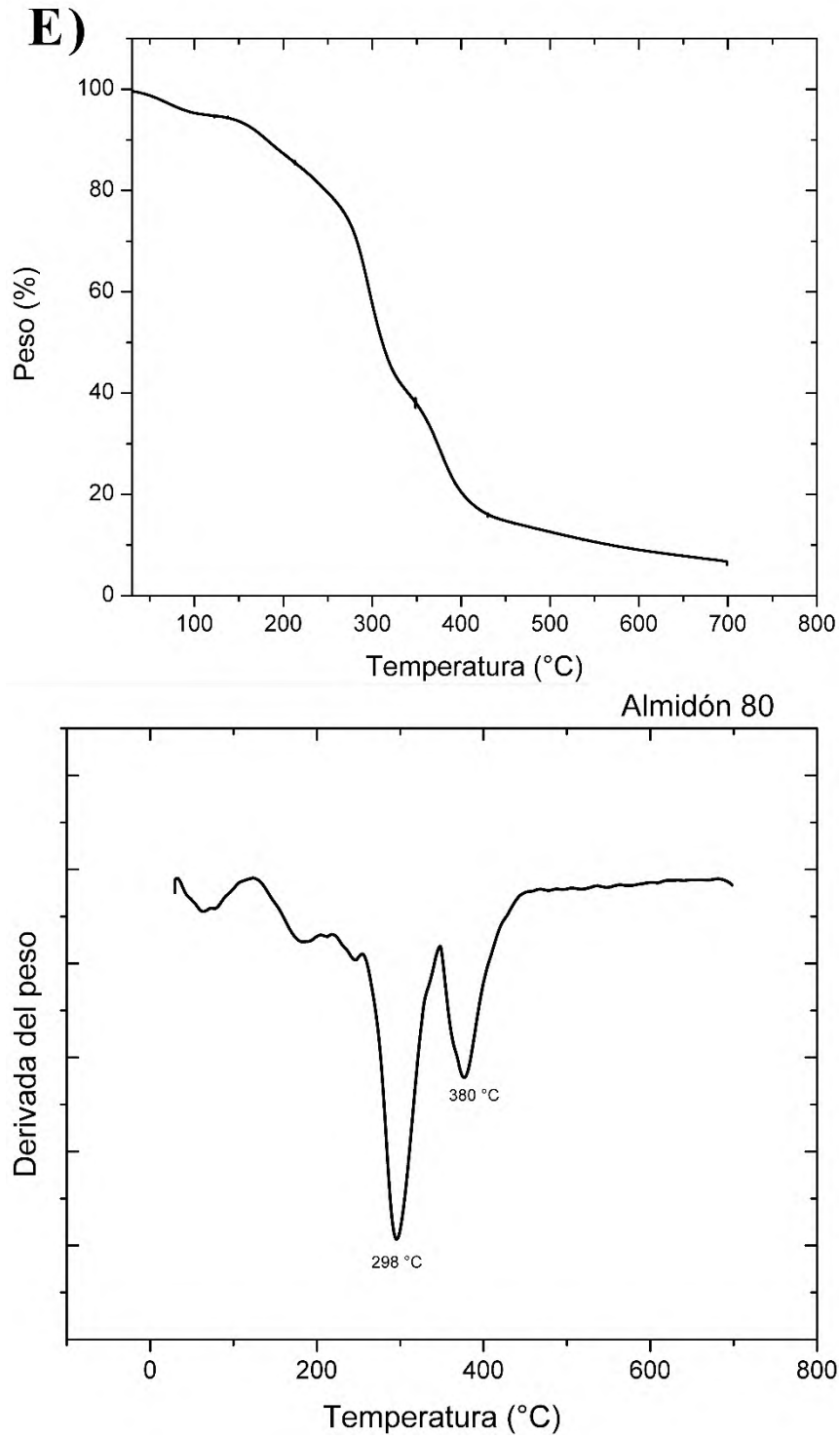


**D)**



Almidón 70





**Figura 13.** Curvas de TGA obtenidas de las películas elaboradas: A (Almidón Nativo), B (50:50 almidón/caucho), C (60:40 almidón/caucho), D (70:30 almidón/caucho), E (80:20 almidón/caucho).

Para el caso de la película 50:50 de almidón/caucho se puede observar en el termograma (**Figura 12-B**) la degradación de 5 componentes en la película, los cuales se degradan a 86, 210, 298, 280 y 612 °C, estas temperaturas de degradación corresponden a la degradación del agua, glicerol, almidón, caucho y acrílico, respectivamente. Con respecto a las otras mezclas de caucho/almidón/acrílico solo se presenta la degradación de almidón y caucho a 298 y 380 °C, respectivamente, coincidiendo con lo que se reporta en la bibliografía para la degradación del almidón.

En cuanto a la generación de cenizas del producto degradado, se obtuvieron los resultados siguientes 3%, 8%, 12%, 6% para las películas 50:50, 60:40, 70:30, 80:20 de almidón/caucho, respectivamente. Se observa una tendencia ascendente del porcentaje de cenizas para los primeros valores de 50 a 70%. A medida que aumenta el contenido de caucho, el porcentaje de humedad disminuye, presentando valores máximos a concentraciones de 70:30 de almidón/caucho.

Con respecto a la estabilidad térmica se pudo observar que las películas de almidón/caucho/acrílico presentaron estabilidad térmica. Las películas de almidón/caucho 60/40 y 70/30 fueron las películas con mayor valor de temperatura de degradación con respecto a la película de solo almidón. Estas últimas películas presentaron un mayor contenido de humedad, favoreciendo las interacciones hidrofílicas del almidón, mientras que en las películas de almidón/caucho/acrílico se favorecieron las interacciones hidrofóbicas.

## 9.5 Pruebas Mecánicas.

En la **Tabla 3** se presentan los valores promedios de las pruebas mecánicas para cada una de las formulaciones de las películas almidón/caucho/acrílico.

**Propiedades Mecánicas de las películas.**

Película (Almidón: Caucho)	Módulo de elasticidad (MPa)	Tensión a la fractura (MPa)	Elasticidad (%)
50:50	6.1609 ± 2.9217	0.9601 ± 0.2666	17.4066 ± 8.3654
60:40	5.1494 ± 1.4689	1.5547 ± 0.8910	33.8333 ± 22.1056
70:30	19.5016 ± 3.2879	3.3681 ± 0.8086	17.2800 ± 2.6946
80:20	12.3811 ± 6.0077	3.2985 ± 0.3799	31.0400 ± 18.1302
Almidón nativo	5.039 ± 0.6480	1.027 ± 0.1100	98.965 ± 6.0820

Promedio de tres repeticiones ± error estándar.

El módulo de elasticidad para la película de solo almidón presentó un valor de 5.039 MPa, mientras que en todas las películas esta propiedad mecánica aumenta su valor. En el caso de la película de 50:50, esta propiedad aumenta hasta alcanzar un valor de 6.1609 MPa,

Mientras que la película 60:40 de almidón/caucho alcanza un valor de 5.1494 Mpa, el cual, es menor una unidad con respecto a la película anterior. Por otra parte, este módulo aumenta conforme disminuye la cantidad de caucho en la formulación de la película, esto podría deberse a que existe una mejor incorporación del caucho a mayor contenido de almidón, teniendo un máximo valor en la película 70:30 de almidón/caucho, donde aumento más de tres veces su valor con respecto a la película de solo almidón.

Con referente a la propiedad de la tensión a la fractura, la película de solo almidón tiene un valor de 1.027, mientras que la película de 70:30 de almidón/caucho presentó un

valor de 3.3684 MPa, un aumento de casi el 327% con respecto al almidón nativo. Mientras que la película 60:40 de almidón/caucho, aumento hasta un 60 % respecto a la película de solo almidón. La película con menor valor de tensión a la fractura fue la película 50:50 de caucho/almidón. El resto de las formulaciones presentaron valores mayores de esta propiedad con respecto a la película de solo almidón.

Por otra parte, hubo una reducción del porcentaje de elasticidad con respecto al almidón puro siendo la película de 70% almidón la que presentó el valor más bajo con un 17.28 %. Mientras que la película 60:40 de almidón/caucho fue la película que más se acercó al porcentaje de elasticidad de la película de solo almidón.

En base a los datos anteriores, se puede concluir que las películas de 70:30 y 60:40 de almidón/caucho presentan mejores valores en propiedades mecánicas. En primer lugar, el módulo de elasticidad aumenta con la disminución de la cantidad de caucho, alcanzando un máximo en la película de 70:30 de almidón/caucho. La película 60:40 de almidón caucho presentó el valor más alto en esta propiedad mecánica con respecto a la película de almidón nativo. Esto sugiere una mejor incorporación del caucho a mayor contenido de almidón.

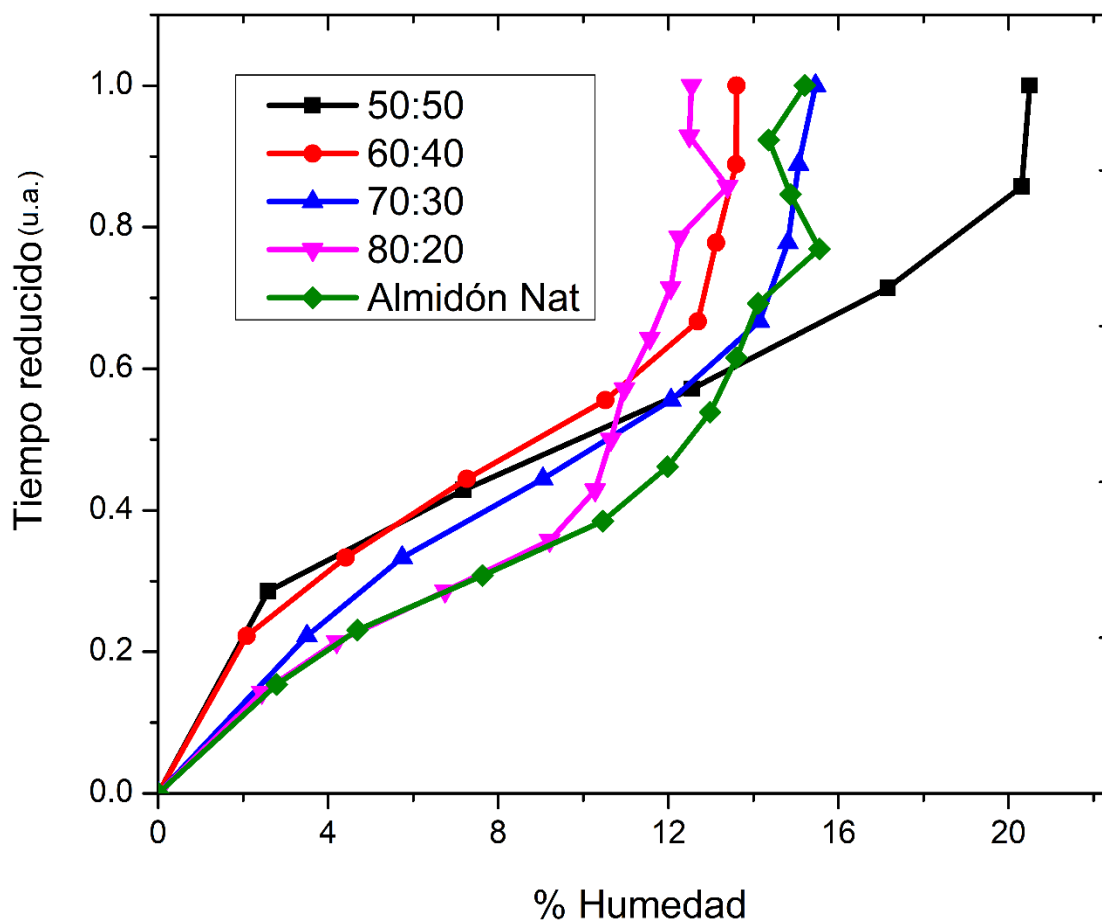
Además, esta película aumento aproximadamente un 327% el valor de la tensión a la fractura en comparación con la película de solo almidón. Aunque, esta película presento una reducción del porcentaje de elasticidad en comparación con la película de almidón nativo.

Por lo tanto, considerando estos resultados, las películas de 70:30 y 60:40 de almidón son las formulaciones adecuadas para la elaboración de películas de almidón/caucho/acrílico. Estas películas podrían tener un gran potencial para ser utilizadas como empaques en la industria alimentaria, lo que podría reducir la dependencia de los materiales plásticos no biodegradables y promover el uso de recursos naturales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la elección de la mejor película puede variar dependiendo de las necesidades

específicas de cada aplicación. Aunque estas dos formulaciones de almidón son las propuestas en este trabajo de investigación, es necesario realizar más pruebas para determinar su idoneidad para aplicaciones específicas.

## 9.6 Determinación de la humedad.

A las películas obtenidas se le determino el contenido de agua en cada una de ellas, en la **Figura 14** se presenta estos resultados.



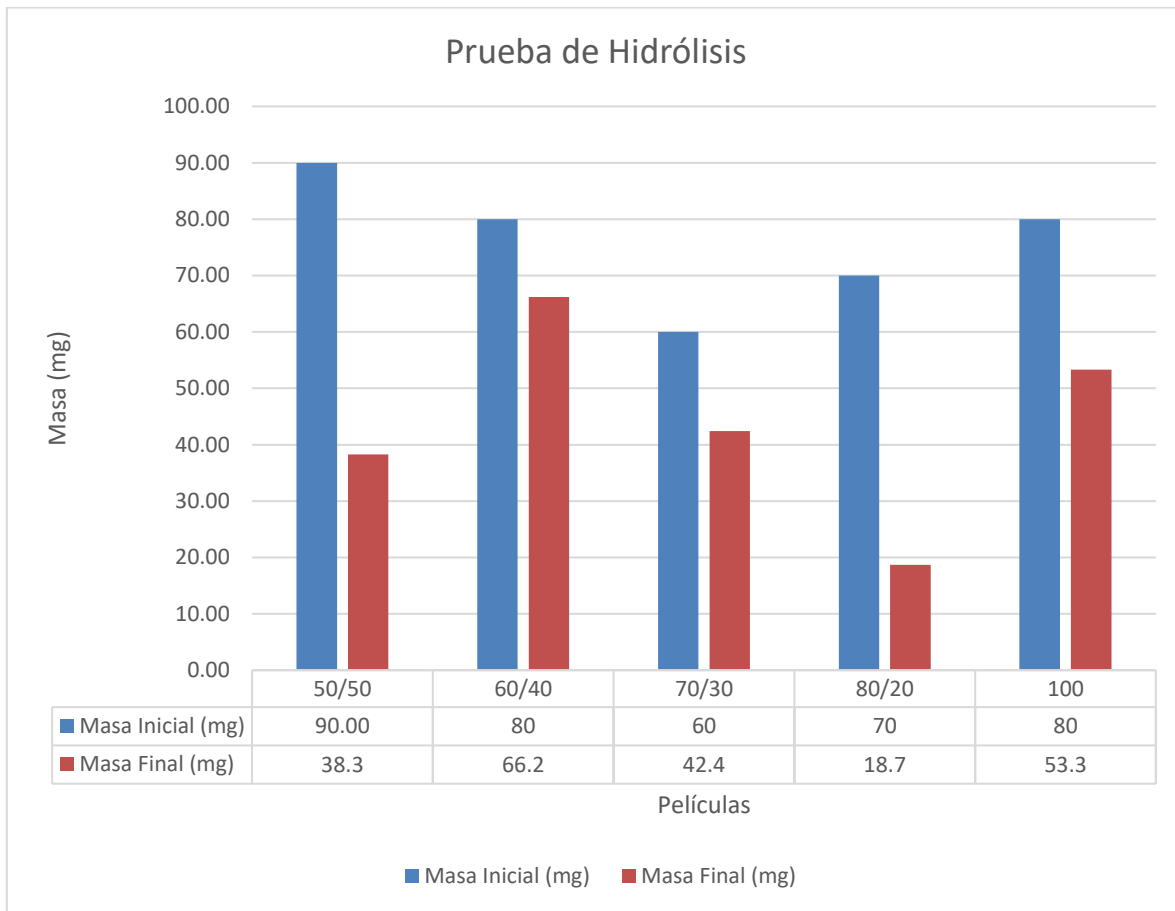
**Figura 14.** Porcentaje de humedad de las películas almidón/caucho/acrílico.

En la **Figura 14** se logra observar que a medida que aumenta el contenido de almidón, disminuye el porcentaje de humedad en las películas, a excepción de la película 50:50 de

almidón caucho. Sin embargo, la influencia del caucho en los niveles de humedad no sigue una tendencia establecida, es decir, no sigue un patrón consistente. Se sabe que almidón puede formar puentes de hidrógeno con los hidroxilos del agua. Sin embargo, la presencia del caucho y del acrílico están provocando una menor afinidad por el agua. Cabe mencionar que esta adsorción de agua favorece que las películas sean más resistentes a su degradación en medios acuosos. Se sabe que un alto contenido de humedad en el almidón afecta sus propiedades fisicoquímicas y su cristalinidad. Por lo tanto, a partir de estos resultados, la película que contiene una proporción 60:40 de almidón/caucho es la película sugerida dada su resistencia a la humedad.

### **9.7 Prueba de Hidrolisis.**

Se realizó la prueba de la degradación de las películas elaboradas de almidón/caucho/acrílico por medio de la hidrólisis acuosa, en la **Figura 15** se presentan los resultados. De acuerdo con los valores obtenidos de esta hidrólisis, se encontró que todas las películas experimentan una degradación. La película que contiene 60:40 de almidón/caucho fue la película que mayor se degradó un 66.2 %. Por otra parte, la película con mayor contenido de almidón presento mayor estabilidad química. Esta diferencia se debe principalmente a la cantidad de caucho en la formulación de las películas. El caucho y el almidón, tiene carácter hidrofóbico e hidrofílico, respectivamente, lo que favorece, que un mayor número de moléculas de agua rodean a las cadenas poliméricas de almidón cuando hay mayor contenido de caucho en la formulación de la película y por lo tanto, esto facilita la degradación de la película. Por el contrario, cuando es mayor el contenido de almidón, las cadenas poliméricas de estas presentas cierto grado de protección a la hidrólisis acuosa debido a que solo algunas quedan solvatadas.

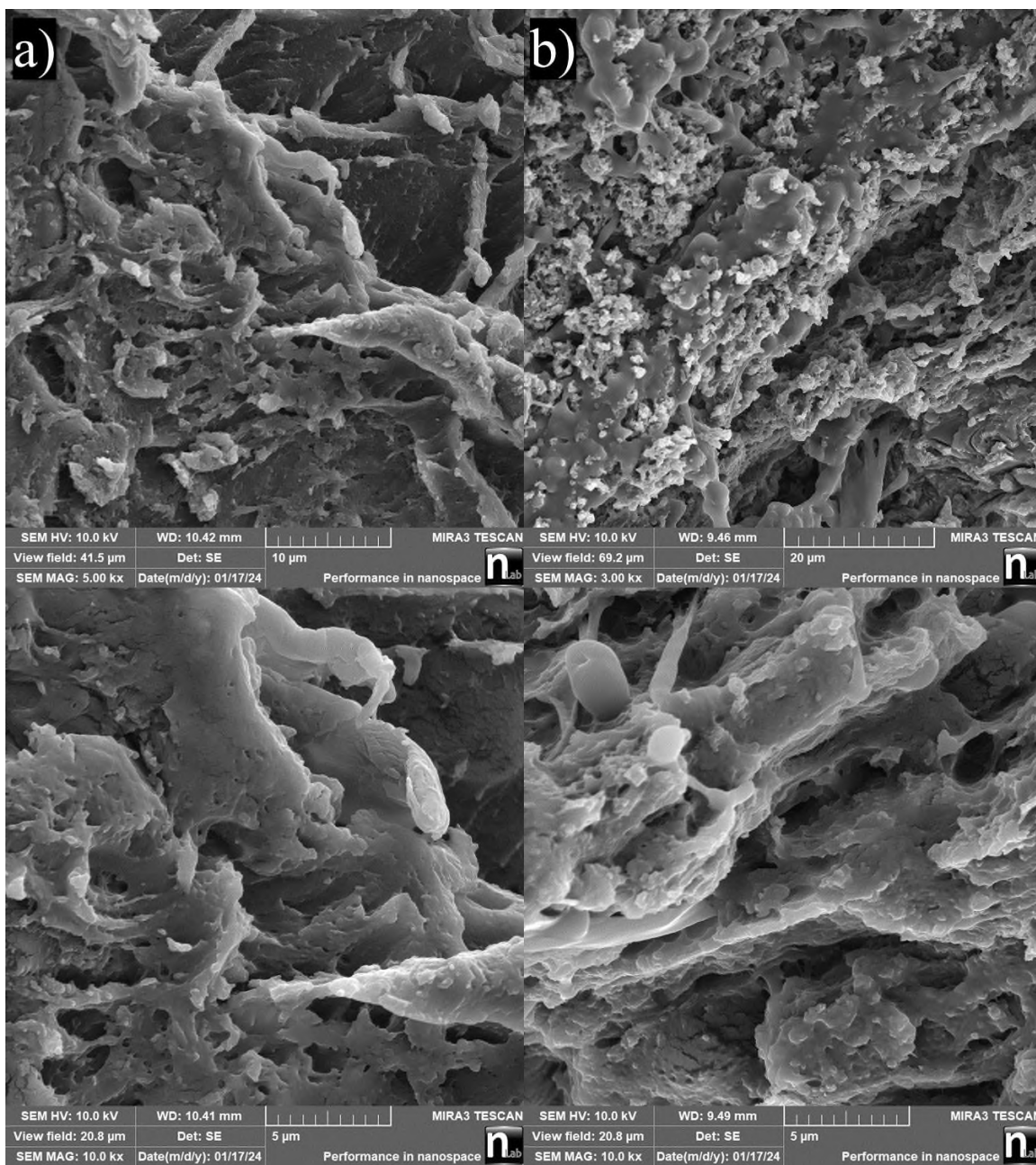


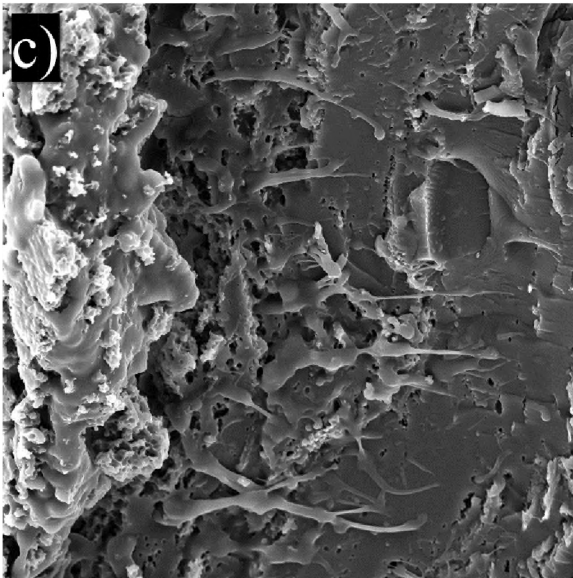
**Figura 15.** Pruebas de hidrólisis acuosa de las películas.

Aunque, en la **Figura 15** no se observa alguna tendencia de formulación-aumento-disminución en la degradación, si se puede concluir que la relación adecuada de estos datos que la película con un 60:40 de almidón/caucho es la película con menor estabilidad en medios acuosos o es más fácil de degradar en este medio.

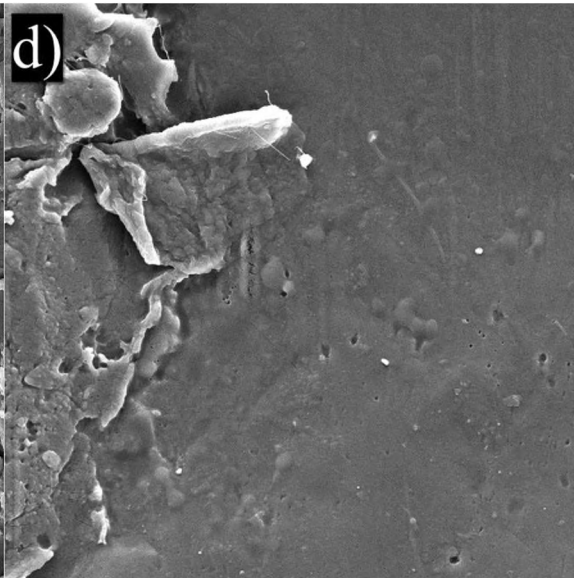
## 9.8 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB - SEM)

Los resultados del análisis mediante microscopía electrónica de barrido, presentados en la **Figura 16**, confirman la coexistencia de almidón y caucho en todas las muestras, con su presencia directamente proporcional a las variaciones en las concentraciones establecidas.

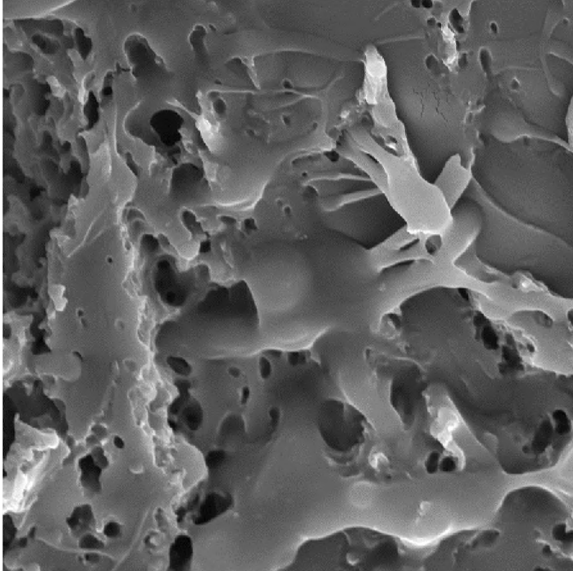




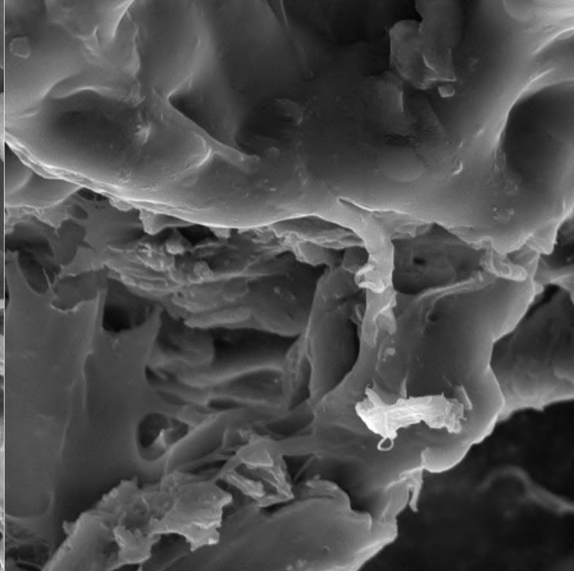
SEM HV: 10.0 kV WD: 9.99 mm MIRA3 TESCAN  
 View field: 69.2  $\mu\text{m}$  Det: SE 20  $\mu\text{m}$   
 SEM MAG: 3.00 kx Date(m/d/y): 01/17/24 Performance in nanospace n<sub>lab</sub>



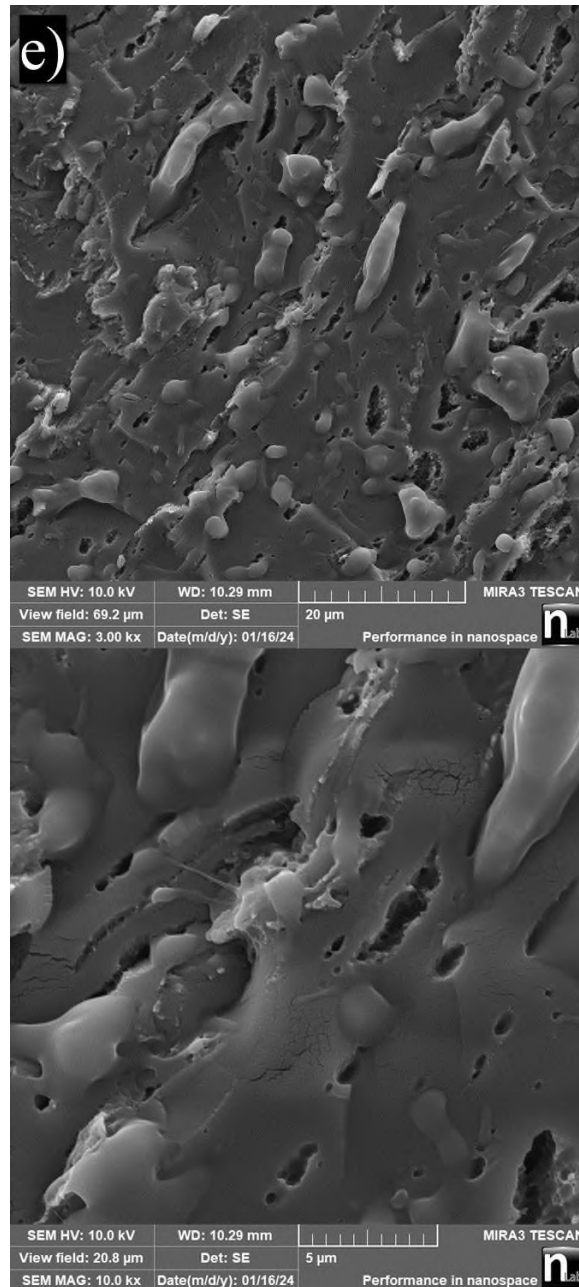
SEM HV: 10.0 kV WD: 9.62 mm MIRA3 TESCAN  
 View field: 69.2  $\mu\text{m}$  Det: SE 20  $\mu\text{m}$   
 SEM MAG: 3.00 kx Date(m/d/y): 12/15/23 Performance in nanospace n<sub>lab</sub>



SEM HV: 10.0 kV WD: 9.99 mm MIRA3 TESCAN  
 View field: 20.8  $\mu\text{m}$  Det: SE 5  $\mu\text{m}$   
 SEM MAG: 10.0 kx Date(m/d/y): 01/17/24 Performance in nanospace n<sub>lab</sub>



SEM HV: 10.0 kV WD: 9.70 mm MIRA3 TESCAN  
 View field: 20.8  $\mu\text{m}$  Det: SE 5  $\mu\text{m}$   
 SEM MAG: 10.0 kx Date(m/d/y): 12/15/23 Performance in nanospace n<sub>lab</sub>



**Figura 16.** Micrografías de las películas elaboradas: A (Almidón Nativo), B (50:50 almidón/caucho), C (60:40 almidón/caucho), D (70:30 almidón/caucho), E (80:20 almidón/caucho).

En las imágenes de SEM se aprecia una buena incorporación de los componentes en las muestras con relaciones de 60:40 y 70:30 de almidón/caucho. Esta proporción favorece una

integración más efectiva y homogénea de los materiales, subrayando la influencia directa de la relación en las proporciones de la mezcla en las características anteriormente mencionadas.

## 10 CONCLUSIONES

Las películas de almidón/caucho/acrílico fueron elaboradas y caracterizadas por diferentes técnicas instrumentales. El aislamiento del almidón de plátano macho se llevó a cabo y caracterizado utilizando diversas técnicas analíticas como FTIR, DSC y TGA, proporcionando una comprensión detallada de las propiedades de la materia prima.

Además, en este trabajo de investigación se determinó la formulación adecuada de las películas de almidón/caucho/acrílico. La caracterización de estas películas mediante FTIR, TGA, DSC y pruebas de humedad, permitieron determinar los cambios en las propiedades térmicas de estas, así como su resistencia a la humedad.

Las propiedades mecánicas de la formulación 60/40 (caucho/almidón) presento mejores propiedades mecánicas. Además, esta formulación de película fue la que más fácilmente se degrado en medios acuosos.

Estas películas tienen alto potencial de ser utilizadas en la industria de los alimentos y plásticos en general.

### **Perspectivas**

- 1.- Llevar a cabo la mezcla de los componentes usando ultrasonido para lograr una mejor dispersión de los componentes de la mezcla de las películas.
- 2.- Analizar las películas por difracción de rayos X.

## 11 REFERENCIAS

- [1] A. Hernandez Ramirez, «Modificación química del almidón de plátano macho (*Musa paradisiaca* L.) por la polimerización in situ de la e-caprolactona y el estudio de sus propiedades,» 2016.
- [2] M. Sujka y J. Jamroz, «Ultrasound-treated starch: SEM and TEM imaging, and functional behaviour,» *Food Hydrocolloids*, vol. 31, nº 2, p. 413–419, 2013.
- [3] L. A. Bello-Pérez, A. De Francisco, E. Agama-Acevedo, F. Gutierrez-Meraz y F. J. L. García-Suarez, «Morphological and Molecular Studies of Banana Starch,» *Food Science and Technology International*, vol. 11, nº 5, pp. 367-372, 2005.
- [4] P. B. Zamudio Flores, A. Vargas Torres, F. Gutiérrez Meraz y L. A. Bello Pérez, «Caracterización fisicoquímica de almidones doblemente modificados de plátano,» *Agrociencia*, vol. 44, pp. 283-295, 2010.
- [5] O. Paredes López, A. Barba de la Rosa, H. L. D. y A. Carabes Trejo, «Amaranto: Características alimentarias y agroindustriales.,» *Centro de Investigación y de estudios avanzados del IPN*, 1990.
- [6] E. Perez Sira, «Characterization of starch insolated from plantain (*musa paradisiaca normalis*),» *Starch*, vol. 49(2), pp. 45-49, 1997.
- [7] D. Thomas y W. Atwell, de *Starches*, St. Paul Minnesota USA, Eagan Press Handbook, 1999, pp. 1-12.
- [8] A. Jiménez, M. J. Fabra, P. Talens y A. Chiralt, «Edible and Biodegradable Starch Films: A Review.,» *Food and Bioprocess Technology*, vol. 5(6), p. 2058–2076, 2012.
- [9] E. Ogunsona, E. Ojogbo y T. Mekonnen, «Advanced material applications of starch and its derivatives.,» *European Polymer Journal.*, vol. 108, pp. 570-581, 2018.
- [10] L. H.M. y M. Misran, «Colloidal And Rheological Properties Of Natural Rubber Latex Concentrate,» *Applied Rheology*, vol. 26, pp. 25-34, 2016.
- [11] L. Bokobza, «Natural Rubber Nanocomposites: A Review,» *Nanomaterials*, vol. 9, p. 12, 2019.
- [12] M. Okamoto, «Potential Application for Tissue Engineering in Natural Rubber Latex,» *Journal of the Rubber Association of Japan*, vol. 91, pp. 331-336, 2018.

- [13] M. B. T., C. A. L. D., B. N. R., M. M. C. R., B. F. A., G. J. L. P., S. R. G., P. C. G., H. R. D. y N. A. M. Q., «Scopolamine loaded in natural rubber latex as a future transdermal patch for sialorrhea treatment,» *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, vol. 68, nº 13, pp. 788-795, 2018.
- [14] E. G. Pawar, «A Review Article on Acrylic PMMA.,» *IOSR Journals*, 2016.
- [15] S.-W. Son y J. H. Yeon, «Mechanical properties of acrylic polymer concrete containing methacrylic acid as an additive.,» *Construction and Building Materials*, vol. 37, p. 669–679, 2012.
- [16] F. F. y M. G., «Synthesis of polybutadiene-acrylates and properties of the photocured films,» *Progress in Organic Coatings*, vol. 54, nº 4, pp. 337-343, 2005.
- [17] S. Rimdusit, P. Wongmanit, S. Damrongsakkul, D. Saramas, C. Jubsilp y I. Dueramae, «Characterizations of Poly(vinyl chloride)/Acrylonitrile Styrene Acrylate Blends for Outdoor Applications,» *Engineering Journal*, vol. 18, pp. 105-118, 2014.
- [18] X. Guan, M. X., H. Zhou, F. Chen y L. Z., « Synthesis and thermal decomposition kinetics of poly(methyl methacrylate)-b-poly(styrene) block copolymers,» *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 30, nº 5, pp. 691-706, 2017.
- [19] H. Charles A. y P. Edward M., «Plastics Materials and Processes: A Concise Encyclopedia,» de *Acrylic: polymethyl methacrylate*, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 7-9.
- [20] D. Van Krevelen y K. T. Nijenhuis, *Properties of Polymers*, Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [21] J. Mina, «Caracterización físico-mecánica de un almidón termoplástico (tps) de yuca y análisis interfacial con fibras de fique.,» *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial.*, vol. 10(2), pp. 99-109, 2012.
- [22] A. J. Carvalho, A. Job, N. Alves, A. A. Curvelo y A. Gandini, «Thermoplastic starch/natural rubber blends.,» *Carbohydrate Polymers*, vol. 53(1), p. 95–99, 2003.
- [23] J. Shey, S. H. Imam, G. M. Glenn y W. J. Orts, «Properties of baked starch foam with natural rubber latex.,» *Industrial Crops and Products*, vol. 24(1), p. 34–40, 2006.
- [24] M. Valodkar y S. Thakore, «Thermal and Mechanical Properties of Natural Rubber and Starch Nanobiocomposites,» *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, vol. 15(6), p. 387–395, 2010.

- [25] Z. Cai, D. Čadek, P. Šmejkalová, A. Kadeřábková, M. Nová y A. Kuta, «The Modification of Properties of Thermoplastic Starch Materials: Combining Potato Starch with Natural Rubber and Epoxidized Natural Rubber,» *Materials Today Communications*, vol. 26, p. 101912, 2020.
- [26] A. Sowińska-Baranowska, M. Maciejewska y P. Duda, «The Potential Application of Starch and Walnut Shells as Biofillers for Natural Rubber (NR),» *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, p. 7968, 2022.
- [27] E. Czarnecka y J. Nowaczyk, «Semi-Natural Superabsorbents Based on Starch-g-poly(acrylic acid): Modification, Synthesis and Application.,» *Polymers*, vol. 12(8), p. 1794, 2020.
- [28] W. Zhu, Z. Yang, A. Yasin, Y. Liu y L. Zhang, «Preparation of Poly(acrylic acid-acrylamide/starch) Composite and Its Adsorption Properties for Mercury (II).,» *Materials*, vol. 14, p. 3277, 2021.
- [29] E. Flores-Gorosquieta, F. García-Suárez, E. Flores-Hiucochea, M. Núñez-Santiago y L. A. Bello-Pérez, «Rendimiento del proceso de extracción de almidón de frutos de plátano (*Musa paradisíaca*). Estudios en planta piloto.,» *Acta Científica Venezolana*, vol. 55, pp. 86-90, 2004.
- [30] AOAC, Determination of Moisture, Ash, Protein and Fat. Official Method of Analysis of the Association of Analytical Chemists, Washington DC.: AOAC, 2005.
- [31] R. Hoover y W. Ratnayake, «Starch characteristics of black bean, chick pea, lentil, navy bean and pinto bean cultivars grown in Canada.,» *Food Chemistry*, vol. 78(4), pp. 489-498, 2002.
- [32] A. Aparicio-Saguilán, A. Aguirre-Cruz, G. Méndez-Montealvo, S. L. RodríguezAmbriz, F. L. García-Suarez, D. E. Páramo-Calderón y L. A. Bello-Pérez, «The effect of the structure of native banana starch from two varieties on its acid hydrolysis.,» *LWT-Food Science and Technology*, vol. 58(2), pp. 381-386, 2014.
- [33] A. Ramírez-Hernández, A. Aparicio-Saguilán, R.-M. G. y C.-A. J., «Multi-objective optimization of process conditions in the manufacturing of banana (*Musa paradisíaca* L.) starch/natural rubber films.,» *Carbohydrate Polymers*, vol. 157, pp. 1125-1133, 2017.
- [34] L. Chen, Y. Ni, X. Bian, X. Qiu, X. Zhuang, X. Chen y X. Jing, «A novel approach to grafting polymerization of  $\epsilon$ -caprolactone onto starch granules.,» *Carbohydrate Polymers*, vol. 60(1), pp. 103-109, 2005.
- [35] C. A. Sandoval Gordillo, G. Ayala Valencia, R. A. Vargas Zapata y A. C. Agudelo Henao, «Physicochemical characterization of arrowroot starch (*Maranta arundinacea* linn) and glycerol/arrowroot starch membranes.,» *International Journal of Food Engineering*, vol. 10(4), pp. 727-735, 2014.

- [36] B. Wei, H. Li, Y. Tian, X. Xu y Z. Jin, «Thermal degradation behavior of hypochlorite-oxidized starch nanocrystals under different oxidized levels.,» *Carbohydrate polymers*, vol. 124, pp. 124-130, 2015.
- [37] J. C. Lucas, V. D. Quintero y C. A. Cárdenas Valencia, «Characterization of flour and starch from guineo plantain AAAea (*Musa sapientum* L.),» *Acta Agronómica*, vol. 62(2), pp. 83-96, 2013.
- [38] M. M. Fares, A. S. El-faqeeh y M. E. Osman, «Graft copolymerization onto starch—I. Synthesis and optimization of starch grafted with N-tert-butylacrylamide copolymer and its hydrogels.,» *Journal of Polymer Research*, vol. 10, pp. 119-125, 2003.
- [39] A. Ramírez-Hernández, J. L. Mata-Mata, A. Aparicio-Saguilán, G. González-García, H. Hernández-Mendoza, A. Gutiérrez-Fuentes y J. E. Báez-García, «The effect of ethylene glycol on starch-g-PCL graft copolymer synthesis,» *Starch/starke*, vol. 68, pp. 1148-1157, 2016.
- [40] S. Alcazar-Alay y M. Meireles, «Physicochemical Properties, Modifications and Applications of Starches from Different Botanical Sources,» *Food Science and Technology*, vol. 35, nº 2, pp. 215-236, 2015.
- [41] R.-C. Silvia, A. Marcos-Fernández, A. Aparicio-Saguilán, R. Navarro-Crespo, A. Ramírez-Hernández, J. E. Báez-García y D. E. Páramo-Calderón, «Modification of banana starch (*Musa paradisiaca* L.) with polyethylene terephthalate: Virgin and bottle waste,» *Carbohydrate Research*, vol. 69, pp. 5-6, 2021.
- [42] J. Johns y V. Rao, «Characterization of Natural Rubber Latex/Chitosan Blends,» *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, vol. 13, nº 4, pp. 280-291, 2008.
- [43] K. Vayyaprontavida, K. Varghese, N. A. Sreekumaran y T. Sabu, «Rubber–rubber blends: A critical review,» *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*, pp. 1-47, 2019.