



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE OAXACA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

TESIS

ELABORACIÓN DE BIOPELÍCULAS CON ALTA RESISTENCIA TÉRMICA

PARA SU APLICACIÓN EN VASOS DE HOJA DE ELOTE

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

MANUEL SARABIA MIGUEL

ASESORA:

M.C. AYMARA JUDITH DÍAZ BARRITA

COMISIÓN REVISORA:

DR. MARCO ANTONIO SÁNCHEZ MEDINA

DR. EMILIO HERNÁNDEZ BAUTISTA

DR. IVÁN ANTONIO GARCÍA MONTALVO

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Agustín Sarabia López y Mirna Miguel guerra y a mi hermana Carmina Sarabia Miguel por su apoyo incondicional.

A mis tíos Mariano Miguel Guerra e Isabel Vásquez Cruz por su apoyo brindado durante mi estadía en la ciudad.

A la M. C. Aymara Judith Díaz Barrita por darme la oportunidad de realizar este proyecto de residencia profesional y por sus conocimientos, confianza y apoyo brindado durante el periodo escolar.

A mis amigos de la universidad por apoyarme de manera incondicional y por los buenos momentos que pasamos durante la carrera universitaria.

Al Instituto Tecnológico de Oaxaca por llevar a cabo mi formación académica de la carrera de Ingeniería Química.

Al personal docente del Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica del Instituto Tecnológico de Oaxaca por mi formación profesional y personal adquirido en mis cuatros años y medio de estancia escolar.

RESUMEN

Las películas y los recubrimientos comestibles, basados en polisacáridos, son actualmente una alternativa para el empackado de alimentos, por su biodegradabilidad y bajo costo de producción, sin embargo, su naturaleza higroscópica y su inestabilidad física son limitantes importantes (Rafieian, Shahedi, Keramat, & Simonsen, 2014).

Los materiales empleados para la formación de filmes y recubrimientos biodegradables están constituidos principalmente de proteínas, lípidos, y polisacáridos. Incluyendo los que son a base de celulosa, quitosano, almidones, dextrinas, alginatos y pectinas. Entre los materiales producidos a partir de desechos de la industria de alimentos que se pueden usar para la elaboración de filmes está el quitosano, el cual puede ser usado para el recubrimiento de empaques de alimentos tales como las frutas y otros vegetales (Alvarado, Arancibia, & Almeida, 2005).

Se elaboraron biopelículas a base de almidón de yuca y glicerol como plastificante. A partir de esto se elaboraron distintas formulaciones (M1, M2, M3 y M4) adicionando fécula de maíz y quitosano. Se evaluaron las siguientes propiedades físicas: espesor, solubilidad y permeabilidad al vapor de agua; y propiedades térmicas como la resistencia térmica de las biopelículas.

Los resultados obtenidos mostraron que la película M4 con espesor de 0.0583 mm, presentó mayor resistencia térmica (91.353 %) a una temperatura de 94°C, menor solubilidad (8.647 %) y una menor permeabilidad al vapor de agua (7.5955×10^{-9} g/mhPa).

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN	11
OBJETIVOS	13
Objetivo General	13
Objetivos específicos	13
JUSTIFICACIÓN	14
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	16
1.1. Polímeros.....	16
1.1.1. Clasificación de los polímeros	16
1.2 Biopolímeros	18
1.2.1 Celulosa.....	19
1.2.2 Almidón.....	19
1.2.2.1 Componentes del almidón	20
1.2.2.2 Propiedades funcionales del almidón	20
1.2.2.3 Almidón de yuca	22
1.2.2.4 Fécula de maíz	23
1.2.3 Quitina y Quitosano	24
1.2.4 Colágeno	24
1.3 Plastificantes	25

ÍNDICE (continuación)

	Página
1.3.1 Glicerol.....	25
1.3.2 Sorbitol.....	26
1.3.3 Polietilenglicol	26
1.4 Películas comestibles.....	27
1.4.1 Técnicas para la elaboración de películas comestibles	27
1.4.2 Ventajas y propiedades que presentan los recubrimientos comestibles....	29
1.4.3 Propiedades físicas de las películas comestibles	30
1.4.3.1 Espesor	31
1.4.3.2 Solubilidad	31
1.4.3.3 Permeabilidad.....	31
1.4.3.4 Permeabilidad al vapor de agua	32
1.4.4 Propiedades superficiales de las películas comestibles	33
1.4.4.1 Adherencia	34
1.4.5 Propiedades térmicas de las películas comestibles.....	34
1.4.5.1 Resistencia térmica	35
1.5 Adhesivos alimentarios	35
1.5.1 Clasificación de adhesivos.....	37
1.5.2 Adhesivos en el envase alimentario.....	40

ÍNDICE (continuación)

	Página
CAPÍTULO II. DESARROLLO EXPERIMENTAL	42
2.1 Elaboración de biopelículas	42
2.2 Evaluación de propiedades físicas	42
2.2.1 Espesor	43
2.2.2 Solubilidad	43
2.2.3 Permeabilidad al vapor de agua	44
2.2.4 Módulo de elasticidad (o de Young)	46
2.3 Evaluación de propiedades térmicas	47
2.3.1 Resistencia térmica	47
CAPÍTULO III. RESULTADOS	48
3.1 Obtención de las biopelículas	48
3.1.1 Formulaciones de las biopelículas	50
3.2 Evaluación de propiedades físicas	51
3.2.1 Espesor	51
3.2.2 Solubilidad	53
3.2.3 Permeabilidad al vapor de agua	55
3.2.4 Módulo de elasticidad (o de Young)	56
3.3 Evaluación de propiedades térmicas	61

ÍNDICE (continuación)

	Página
3.3.1 Resistencia térmica.....	61
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES	65
CAPITULO V. REFERENCIAS	67
ANEXOS	78

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Composición de las películas utilizando diferentes biopolímeros	42
Cuadro 2. Características de las películas obtenidas.....	50
Cuadro 3. Formulaciones de películas con diferentes biopolímeros.	51
Cuadro 4. Espesores obtenidos de las biopelículas formadas.	51
Cuadro 5. Solubilidad de biopelículas a base de yuca.	53
Cuadro 6. Permeabilidad al vapor de agua de las películas formadas.....	55
Cuadro 7. Módulo de Young.....	60
Cuadro 8. Resistencia térmica de las películas formadas.	61

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Manihot esculenta Crantz. (Bargues, 2022)	22
Figura 2. Biopelículas a base de almidón de yuca. a) Película M1, b) Película M2, c) Película M3, d) Película M4.	49
Figura 3. Prueba de solubilidad de las películas en agua.	53
Figura 4. Prueba de permeabilidad al vapor de agua de las películas.	55
Figura 5. Texturómetro INSTRON Serie 4442.	57
Figura 6. Módulo de Young para las cuatro formulaciones (Robayo Gallego, 2018).	60
Figura 7. Esfuerzo máximo para las cuatro formulaciones (Robayo Gallego, 2018).	60
Figura 8. Prueba de resistencia térmica de las películas en agua.	62

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Página
Gráfica 1. Espesor de las películas formadas.	52
Gráfica 2. Solubilidad de las películas formadas.	54
Gráfica 3. Diagrama Esfuerzo-Deformación de las películas formadas: a) Película M1, b) Película M2, c) Película M3, d) Película M4.	58
Gráfica 4. Módulo de Young para las cuatro películas.	59
Gráfica 5. Esfuerzo máximo para las cuatro películas.....	59
Gráfica 6. Resistencia térmica de las películas.	63

INTRODUCCIÓN

Actualmente se investiga alternativas para minimizar el impacto medioambiental de los polímeros tradicionales. Hay muchos reportes acerca del uso de polímeros biodegradables como materiales industriales, entre éstos el almidón (Tomka, 1998). Su capacidad de gelificar permite moldearlo y formar películas (Rimsa & Tatarka, 2009). Según (Andersen & Hodson, 2001), éste puede provenir del maíz, papa, trigo, sorgo, yuca, caña, entre otros y puede encontrarse en concentraciones entre el 30 y el 70% de la composición polimérica (Tomka, 2000). El almidón puede usarse en su estado nativo o modificado.

Por su abundancia, bajo costo y biodegradabilidad, el almidón de yuca puede usarse en la producción de películas. Sin embargo, su aplicación requiere del mejoramiento de sus propiedades mecánicas y de barrera. Estos problemas pueden resolverse con la adición de plastificantes como el glicerol, pese a su hidrofilia y permeabilidad a los gases (Cholwasa, Duangdao, & Kawee, 2003). Este inconveniente puede ser superado con la adición de quitosano, que provee propiedades de barrera y antimicrobianas (Devlieghere, Vermeulen, & Debevere, 2004).

Una película comestible es una estructura formada por varias capas delgadas y continuas de materiales que pueden ser ingeridos por el ser humano, actúan principalmente como barrera a la transferencia de humedad, oxígeno, dióxido de carbono, aroma y lípidos, son un medio para transportar aditivos (antimicrobianos, antioxidantes, saborizantes, etc.) y ayudan a mejorar las características de manipulación e integridad estructural del alimento (Krochta & De Mulder-Johnston, 1997).

La adición de plastificantes a las soluciones filmogénicas empleadas para elaborar películas comestibles logra disminuir las fuerzas de atracción intermoleculares, modificando las propiedades mecánicas y de permeabilidad a gases (Gontard, Guilbert, & Cug, 1993).

Por ello, se busca obtener una formulación adecuada de biopelícula a base de almidón de yuca que logre tener alta resistencia térmica y baja solubilidad para su posterior aplicación como recubrimiento en vasos de hoja de elote, que ayuden a la estructura e impermeabilidad de envases biodegradables.

OBJETIVOS

Objetivo General

Elaborar películas con diferentes biopolímeros que permitan una alta resistencia térmica.

Objetivos específicos

1. Elaborar películas biodegradables con diferentes biopolímeros.
2. Determinar parámetros fisicoquímicos en las películas biodegradables.
3. Determinar resistencia térmica en las películas biodegradables.

JUSTIFICACIÓN

Mucha gente desconoce la utilidad de las biopelículas y la conservación de alimentos, por lo que es necesario aplicar técnicas de conservación con materiales orgánicos biodegradables innovadores (envases) que permitan conservar los alimentos después de la cosecha.

Los recubrimientos y películas comestibles, son una alternativa para mejorar y prolongar la calidad de los alimentos durante el manejo pre y postcosecha, así como el procesado, transporte y almacenamiento de los mismos (Espino-Díaz, y otros, 2010); además, de ser una sustitución de plásticos.

La aplicación de películas o recubrimientos comestibles (biopelículas) es una tecnología que está ganando importancia para prolongar la conservación de la calidad en fresco de frutas y hortalizas. No sólo constituyen barreras que reducen la permeabilidad e intercambio de moléculas con el ambiente, sino que además son un excelente vehículo para la incorporación de agentes antimicrobianos naturales que garantizan la seguridad alimenticia sin contribuir a la contaminación ambiental (Salgado Garciglia, 2023).

Con la creación de biopelículas, se busca proporcionar el soporte para los vasos a base de hojas de elote, mejorar su resistencia térmica, disminuir la solubilidad en agua y retardar la permeabilidad al vapor de agua.

En este trabajo se propone la elaboración de biopelículas utilizando diferentes biopolímeros con la finalidad de estudiar sus propiedades físicas, superficiales y

térmicas, ya que se requiere un recubrimiento para el desarrollo de vasos biodegradables a base de hojas de elote.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1. Polímeros

Los polímeros son moléculas de gran tamaño, constituidas por “eslabones” orgánicos denominados monómeros, unidos mediante enlaces covalentes. Los eslabones están formados, fundamentalmente, por átomos de carbono y pueden poseer grupos laterales o radicales con uno o más átomos. Estas moléculas orgánicas son las que constituyen los materiales plásticos que conocemos y también los tejidos de los seres vivos (Hermida, 2011).

1.1.1. Clasificación de los polímeros

Según la Universidad Tecnológica Nacional (2014), la clasificación de los polímeros según su origen, tipo de monómeros, forma y su comportamiento térmico es la siguiente:

1. Según su origen:

- a) **Naturales:** Los polímeros naturales son todos aquellos que provienen de los seres vivos, por lo tanto, dentro de la naturaleza podemos encontrar una gran diversidad de ellos. Las proteínas, los polisacáridos, los ácidos nucleicos son todos polímeros naturales que cumplen funciones vitales en los organismos y por tanto también se los suele llamar biopolímeros.
- b) **Sintéticos:** Los polímeros sintéticos son los que se obtienen por síntesis ya sea en una industria o en un laboratorio, y puede o no estar formados a base de monómeros naturales. Los polímeros semi sintéticos son resultado de la modificación o purificación de un monómero natural.

2. Según el tipo de monómero:

- a) **Homopolímeros:** Los homopolímeros son macromoléculas que están formadas por monómeros idénticos, la celulosa y el caucho son homopolímeros naturales, mientras que el PVC y el Polietileno son sintéticos.
- b) **Copolímeros:** Los copolímeros están constituidos por 2 o más monómeros diferentes, por ejemplo, la seda como copolímeros naturales, y la baquelita como sintético.

3. Según su forma:

- a) **Lineales:** Los lineales se forman cuando el monómero que lo origina tiene 2 puntos de “ataque” (de unión), de modo que la polimerización ocurre en una sola dirección, pero en ambos sentidos.
- b) **Ramificados:** Los polímeros ramificados, se forman debido a que, a diferencia del lineal, estos tienen 3 o más puntos de “ataque”, de tal forma que la polimerización ocurre en forma tridimensional.

4. Según su comportamiento térmico:

- a) **Termoplásticos:** son materiales sólidos, relativamente duros a temperatura ambiente, pero se vuelven blandos y moldeables al elevar la temperatura, por lo que se pueden fundir y moldear varias veces, sin que varíen mucho sus propiedades, esto los hace reciclables. Son termoplásticos debido a que sus cadenas, sean lineales o ramificadas, no están unidas, o sea, presentan entre

sus cadenas “fuerzas” intermoleculares, que se debilitan con un aumento en la temperatura, provocándose el reblandecimiento.

b) Termoestables o termorígidos: son materiales que suelen ser rígidos y frágiles (no necesariamente), y con cierta resistencia térmica. Una vez que son moldeados/o reaccionan químicamente, no se pueden volver a cambiar en la que a forma respecta, porque no se ablandan cuando se calientan, volviéndolos esto no reciclables. Son termoestables porque sus cadenas están interconectadas por medio de ramificaciones que son más cortas que las cadenas principales o con muchas uniones químicas.

1.2 Biopolímeros

Los polímeros naturales o biopolímeros son compuestos sintetizados por los seres vivos y cumplen funciones biológicas (como el caso de las proteínas, ácidos nucleicos), estructurales (polisacáridos) y de defensa o mantenimiento de la actividad acuosa (biopelículas). Las fuentes naturales de biopolímeros abarcan diversos grupos biológicos (algas, plantas, animales, bacterias y hongos). En la actualidad, los biopolímeros se pueden combinar con moléculas sintéticas impactando en su resistencia y flexibilidad (Velde & Kiekens, 2002).

Los biopolímeros ofrecen una ventaja sobre los materiales sintéticos dada su biocompatibilidad, biodegradabilidad, baja antigenicidad y que son renovables (Sahana & Rekha, 2018).

Entre los polímeros naturales derivados de polisacáridos más importantes se encuentra la celulosa, el almidón, la quitina y el quitosano y entre los derivados de proteínas se encuentra el colágeno (Oliva, 2012; Vroman & Tighzert, 2009).

1.2.1 Celulosa

La celulosa es producida por las plantas como un polisacárido estructural. Se compone exclusivamente de unidades de glucosa unidas por enlaces α -1, 4- glucosídicos. La celulosa se obtiene de la madera de árboles como el pino o de plantas herbáceas con gran cantidad de celulosa en el tallo y el proceso más utilizado para su extracción es el método de Kraft (Oliva, 2012). Entre las propiedades más interesantes de la celulosa se encuentra su cristalinidad e insolubilidad en agua y en solventes orgánicos. Su insolubilidad se atribuye a los múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas que dificultan la penetración del agua.

1.2.2 Almidón

El almidón es otro polisacárido cuya principal fuente de obtención son el maíz, trigo y papa. Su composición se distribuye aproximadamente de 20-30% de amilosa y 70-80% de amilopectina dependiendo de la fuente de almidón (Kumar, Shukla, Singh, Prabhakaran, & Tanwar, 2014). De manera más específica, el almidón presenta capas internas de amilosa y capas externas de amilopectina. El almidón se presenta en gránulos hidrofílicos ordenados en capas y entre las propiedades que presenta se encuentra su semicristalinidad, en donde la amilosa es la responsable de la mayor porción de cristalinidad del polisacárido, ya que esta forma cadenas lineales que por puentes de hidrógeno entre los hidroxilos forman una doble hélice (Vroman & Tighzert, 2009).

1.2.2.1 Componentes del almidón

El almidón está constituido por unidades de glucosa dispuestas en dos componentes: amilosa y amilopectina; su proporción varía de un tipo a otro según sea su fuente. Estas macromoléculas se caracterizan por su grado de polimerización o ramificación lo cual afecta su comportamiento frente a los procesos de degradación.

Amilosa: Es un polímero lineal que consta de moléculas de glucosa unidas por enlaces glucosídicos α -D-(1 $\rightarrow$ 4), el número de unidades varía entre los diferentes tipos de almidones, pero generalmente se encuentra entre 1 000 unidades de glucosa por molécula de amilosa y tiene forma de espiral (Wurzburg, 1986).

Amilopectina: Es un polímero ramificado formado por cadenas lineales constituidas por 15-35 moléculas de glucosa unidas por enlaces α -D-(1 $\rightarrow$ 4). Estas cadenas están unidas entre ellas por enlaces α -D-(1 $\rightarrow$ 6) que forman los puntos de ramificación. La amilopectina tiene 5-6 por ciento de enlaces α -D-(1 $\rightarrow$ 6) y está constituida de alrededor de 100 000 moléculas de glucosa (Duprat, Gallant, Guilbot, Mercier, & Robin, 1980).

1.2.2.2 Propiedades funcionales del almidón

Las propiedades funcionales de los almidones dependen directamente de la relación amilosa/amilopectina. En los distintos cultivos amiláceos esta relación es constante, si bien cambia de una variedad a otra dentro de la especie y también entre plantas de la misma variedad.

Las características funcionales de los almidones son: solubilidad, capacidad de retención de agua, poder de hinchamiento, tendencia a retrogradar, propiedades de la pasta (viscosidad, consistencia, estabilidad del gel, claridad y resistencia al corte,

formación de película), digestibilidad enzimática y capacidad de emulsificación. Durante un tratamiento hidrotérmico, el almidón sufre una serie de modificaciones que van a influir sobre su estructura, pasando por tres fases importantes: gelatinización, gelificación y retrogradación, los cuales causan hinchamiento, hidratación, fusión y ruptura de los gránulos de almidón (Aristizábal & Sánchez, 2007).

Gelatinización

En una primera fase el agua se difunde por las zonas amorfas del gránulo de almidón, produciéndose un primer hinchamiento que es reversible. Durante esta etapa de cocción, la amilosa se solubiliza y el almidón sufre una dispersión coloidal constituida por una fase continua o disolvente que se enriquece en amilosa y una fase dispersa de gránulos de almidón hinchados y enriquecidos en amilopectina. En esta etapa, los gránulos conservan sus propiedades ópticas incluyendo la capacidad de refractar la luz polarizada (birrefringencia), la cual está asociada a la alineación de las moléculas dentro del gránulo. Se ha observado que los gránulos de almidón de yuca tienen baja birrefringencia a temperaturas entre 58-64 °C, comparados con los gránulos de maíz que la poseen a temperaturas entre 62-68 °C. Si el calentamiento continúa, las moléculas de agua alrededor de los gránulos rompen los enlaces de hidrógeno en el interior de los gránulos, estos absorben agua lentamente y se hinchan. Este proceso es irreversible y ocurre después de que se alcanza una temperatura crítica que depende de la humedad presente, definida como la temperatura de transición vítrea T_g (Temperatura de gelatinización) la cual es característica de cada almidón, pero también depende de la concentración de la suspensión. Cuando la molécula de almidón está completamente hidratada empieza a expandirse (se abre la hélice de la

cadena) primero hacia el extremo externo y la cadena lineal más corta (amilosa) tiende a difundirse. Alcanzada esta temperatura se incrementa el hinchamiento y la birrefringencia desaparece; este fenómeno endotérmico se denomina gelatinización (Waniska & Gómez, 1992).

Gelificación y retrogradación

Durante la etapa de enfriamiento se distinguen dos etapas, la gelificación y la retrogradación. En la gelificación las moléculas de almidón se vuelven menos solubles y tienden a agregarse. La retrogradación es la cristalización de las cadenas de los polímeros que son agregados en el gel, cuando las pastas de los almidones son enfriadas y ocurre en tres estados: a) dilatación de las cadenas debido al rompimiento de los enlaces intermoleculares que mantienen la configuración helicoidal, b) pérdida del límite de agua seguido de una reorientación de las moléculas y, finalmente c) una formación de enlaces de hidrogeno entre moléculas adyacentes formando una estructura cristalina (Mestres, 1996).

1.2.2.3 Almidón de yuca

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es una planta perenne cultivada a lo largo del trópico, apreciada por sus raíces con grandes contenidos de almidón y usada para la alimentación humana y animal, y producción de etanol, entre otros (Howeler, 2012).



Figura 1. *Manihot esculenta* Crantz. (Bargues, 2022)

La yuca (Figura 1) pertenece a la familia *Euphorbiaceae*. Esta familia está constituida por unas 7,200 especies que se caracterizan por el desarrollo de vasos laticíferos compuestos por células secretoras o galactocitos que producen una secreción lechosa. Su centro de origen genético se encuentra en la Cuenca Amazónica. Dentro de esta familia se encuentran tipos arbóreos como el caucho, *Hevea brasiliensis*; arbustos como el ricino o higuera, *Ricinus communis* y numerosas plantas ornamentales, medicinales y malezas además del género *Manihot* (Aristizábal & Sánchez, 2007).

El almidón de yuca es la segunda fuente de almidón en el mundo después del maíz, pero por delante de la papa y el trigo; se usa principalmente sin modificar, es decir como almidón nativo, pero también es usado modificado con diferentes tratamientos para mejorar sus propiedades de consistencia, viscosidad, estabilidad a cambios del pH y temperatura, gelificación, dispersión y de esta manera poder usarlo en diferentes aplicaciones industriales que requieren ciertas propiedades particulares (Aristizábal & Sánchez, 2007).

1.2.2.4 Fécula de maíz

La fécula de maíz, también conocido en algunos países como almidón de maíz, es un carbohidrato extraído de los endospermos blancos que se encuentra en el centro de todos los granos de maíz, estos se muelen en un polvo fino que se usa regularmente como agente espesante (Nabor, 2020).

Este producto no contiene gluten, por lo que es una buena alternativa para utilizar como espesante en las recetas de salsas y cremas, pues la fécula de maíz se

compone de largas cadenas de moléculas de almidón que cuando se calientan y humedecen, éstas se desenredarán e hincharán.

1.2.3 Quitina y Quitosano

La quitina es el segundo polímero más abundante de la naturaleza, después de la celulosa. Es un polisacárido y un copolímero lineal constituido por unidades de N-acetilglucosamina y N-glucosamina con enlaces -1,4 (Vroman & Tighzert, 2009). La quitina se produce en el organismo a partir de glucosa y enzimas como la quitina sintetasa. Por otro lado, la α -quitina se obtiene comercialmente de exoesqueletos triturados de camarones, langostas y cangrejos (Mármol, y otros, 2011).

El quitosano es la forma N-desacetilada de la quitina, y este suele ser el producto de la desacetilación de la quitina al tratarla con un álcali. En el quitosano la N-glucosamina es predominante y la proporción de N-glucosamina con N-acetilglucosamina depende del método de desacetilación; el grado de desacetilación reportado se encuentra aproximadamente del 30 a 100% (Kumar, Shukla, Singh, Prabhakaran, & Tanwar, 2014). El quitosano al igual que la quitina es insoluble en agua debido a su estructura compacta y cristalina que presenta puentes de hidrógeno intra e intermoleculares. Estos polímeros presentan propiedades muy interesantes como la capacidad de formar películas sin aditivos, su permeabilidad de oxígeno y monóxido de carbono, buenas propiedades mecánicas (Kumar, Shukla, Singh, Prabhakaran, & Tanwar, 2014).

1.2.4 Colágeno

A diferencia de los biopolímeros antes mencionados, el colágeno está formado por proteínas y este es el componente principal del tejido conectivo en los animales y en

el cuerpo humano. El colágeno se compone de aminoácidos como la lisina, prolina, hidroxiprolina y glicina y se sintetiza de aminoácidos libres en el cuerpo. Entre las propiedades que presenta el colágeno se encuentra su alta reactividad, lo que permite que este pueda ser entrecruzado con otros grupos funcionales como los aldehídos y polietilenglicol entre otros, con el fin de obtener geles que se pueden utilizar en aplicaciones como liberación controlada de fármacos (Nair & Laurencin, 2007).

1.3 Plastificantes

Además del componente de naturaleza polimérica y de alto peso molecular (matriz), otro componente importante de los recubrimientos comestibles son los plastificantes. Estos son moléculas pequeñas de bajo peso molecular, de baja volatilidad y con una naturaleza química similar a la del polímero formador de recubrimiento. Se usan para mejorar la flexibilidad y la funcionalidad de los recubrimientos. Generalmente se requieren plastificantes como el glicerol en las formulaciones a base de polisacáridos y de proteínas, para aumentar la flexibilidad de los recubrimientos al aumentar el volumen libre o la movilidad molecular de los polímeros ya que reducen los enlaces hidrógeno internos entre las cadenas de polímeros. Los plastificantes afectan la capacidad de atracción de agua del sistema y generalmente suelen aumentar la permeabilidad al oxígeno de los recubrimientos comestibles (Sothornvit & Krochta, 2000).

1.3.1 Glicerol

El glicerol, o glicerina, es un poliol incoloro, inodoro y soluble en agua, formador de soluciones neutras y aprobadas por la FDA para aplicarse en alimentos sin riesgo

alguno. Su fórmula química es $C_3H_8O_3$ y su peso molecular es 92.09 g/mol (Burdock, 2010).

El glicerol es el plastificante más utilizado en la elaboración de recubrimientos y películas comestibles, adicionado generalmente a bajas concentraciones, ya que, de lo contrario, el plastificante influye negativamente en la permeabilidad de los recubrimientos (Arvanitoyannis, Nakayama, & Aiba, 1998).

1.3.2 Sorbitol

El sorbitol es un polialcohol de azúcar que se obtiene por reducción del monosacárido más común, la glucosa. Es un líquido con consistencia de jarabe, de aspecto claro, inodoro, incoloro, viscoso, de pH neutro y libre de partículas en suspensión. Su sabor es dulce y refrescante. Es totalmente soluble en agua, glicerina y propilenglicol. Es utilizado además como plastificante, generalmente de productos a base de goma y gelatina, aportando cuerpo y sabor (Arvanitoyannis, Nakayama, & Aiba, 1998).

1.3.3 Polietilenglicol

El polietilenglicol es un polímero con buenas propiedades lubricantes y formadoras de películas (Dhawan, Dhawan, Varma, & Sinha, 2005). Es un polímero con una estructura repetitiva de $-CH_2-CH_2-O-$ y con dos grupos hidroxilo ($-OH$) finales, con lo que puede ser afín al almidón por su carácter hidrofílico. En los estudios de Kondo & Sawatari (1994) y Tuncer, Serkan, Mehmet, & Olgun (2005), se observó que los grupos hidroxilo de la celulosa, la metilcelulosa y del alginato de sodio pueden formar puentes de hidrógeno con el grupo éter del polietilenglicol. Por lo que el almidón también podría formar puentes de hidrógeno con el grupo éter del polietilenglicol.

1.4 Películas comestibles

Un recubrimiento comestible (RC) se puede definir como una matriz transparente continua, comestible y delgada, que se estructura alrededor de un alimento generalmente mediante la inmersión del mismo en una solución formadora del recubrimiento con el fin de preservar su calidad y servir de empaque. Por otra parte, una película comestible (PC) es una matriz preformada, obtenida por moldeo, cuyo espesor es siempre mayor al de los RC (Del-Valle, Hernández-Muñoz, Guarda, & Galotto, 2005). Dichas soluciones formadoras de la película o recubrimiento pueden estar conformadas por un polisacárido, un compuesto de naturaleza proteica, lipídica o por una mezcla de éstos. A pesar de sus diferencias, ambas proceden de igual manera frente a diversas sustancias que actúan sobre el alimento como barrera frente al transporte de gases y vapor de agua durante su conservación (Vasconez, Flores, Campos, Alvarado, & Gerschenson, 2009).

1.4.1 Técnicas para la elaboración de películas comestibles

Las técnicas comúnmente utilizadas para la elaboración de las películas y recubrimientos comestibles son las siguientes:

- a) Por eliminación del disolvente:** En este proceso se forma y se estabiliza una estructura molecular por interacciones físicas y químicas. La disolución formadora del hidrocoloide comestible se incorpora en un disolvente (agua, etanol, ácido acético) que contiene a los aditivos como, plastificantes, agentes de reticulación o solutos; paso seguido se elimina el disolvente, con lo que se forma una capa delgada que se seca y que finalmente se puede desprender (Cagri, Ustunol, & Ryser, 2004).

- b) Por Gelación Térmica:** La aplicación de un tratamiento térmico en este proceso permite la formación de un gel estable de estructura rígida. Ésta es utilizada generalmente para películas y recubrimientos elaborados a base de proteínas, descrita como un proceso en el que la desnaturalización térmica desestabiliza las moléculas de proteínas, las cuales dan lugar a la formación de un entramado estable entre partículas (Carmona Gallego, Cordobés, Guerrero Conejo, Martínez, & Partal López, 2007).
- c) Por Solidificación:** En este método las macromoléculas junto con el plastificante, son disueltas hasta su homogeneización y son vertidas en capas finas sobre moldes (Ávila-Sosa, y otros, 2012).
- d) Por el método de “Casting”:** Una vez realizada la disolución de los componentes de la película, se realiza la evaporación del disolvente a temperatura y humedad controladas, provocando la formación de la película (Escobar, Sala, Silvera, Harispe, & Márquez, 2009).
- e) Por “electrospraying” (Pulverización electrohidrodinámica):** Es un método de atomización del líquido formador de la película por medio de fuerzas eléctricas, en donde el líquido sale por una boquilla con un alto potencial eléctrico. La ventaja de este método es que las gotas que se obtienen son tan pequeñas que el tamaño de su partícula llega a medir incluso nanómetros, y la carga y el tamaño pueden controlarse en cierta medida por medios eléctricos (Jaworek & Sobczyk, 2008).
- f) Por Microfluidización:** Proceso en que las dispersiones se hacen pasar a través de microcanales, lo que permite la obtención de nanopartículas que

otorgan a la película mejores características físicas, y posteriormente se aplica el método de casting para la formación de la película (Monroy-Villagrana, Cano-Sarmiento, Alamilla-Beltrán, Hernández-Sánchez, & Gutiérrez-López, 2014).

1.4.2 Ventajas y propiedades que presentan los recubrimientos comestibles

Un RC o PC es un material de envoltura (empaquete) delgado empleado en la industria de alimentos y que puede ser consumido como parte del mismo, debido a que proviene de polímeros biodegradables, no tóxicos y que ayudan a incrementar la calidad de los alimentos durante su conservación (Sánchez-González, Pastor, Vargas, Chiralt, & González-Martínez, 2011). Según Falguera, Quintero, Jiménez, Muñoz, & Ibarz (2011) las películas y recubrimientos deben presentar ciertas exigencias funcionales que permitan controlar o aminorar las causas de alteración de los alimentos a recubrir, algunas de estas ventajas y propiedades son:

1. Ser libres de tóxicos y seguros para la salud.
2. Deben requerir una tecnología simple para su elaboración.
3. Ser protectores de la acción física, química y mecánica.
4. Presentan propiedades sensoriales: deben ser transparentes y no ser detectados durante su consumo.
5. Mejoran las propiedades mecánicas y preservan la textura.
6. Prolongan la vida útil de alimentos a través del control sobre el desarrollo de microorganismos.
7. Pueden regular distintas condiciones de interfase o superficiales del alimento, a través del agregado de aditivos como antioxidantes, agentes antimicrobianos y nutrientes.

8. Presentan propiedades de barrera como transferencia de distintas sustancias, adecuada permeabilidad al vapor de agua, solutos y una permeabilidad selectiva a gases y volátiles, desde el alimento hacia el exterior y viceversa.

Dichos recubrimientos al controlar transferencia de humedad, gases, y compuestos volátiles, han demostrado la capacidad de mejorar la integridad y la calidad de los alimentos, además de prolongar su vida de almacenamiento. Sin embargo; al recubrir un fruto u hortaliza para retardar la pérdida de humedad, es necesario que exista una cierta permeabilidad al oxígeno y dióxido de carbono para evitar una respiración anaeróbica que podría inducir desórdenes fisiológicos y una pérdida rápida de la calidad y vida de anaquel en los mismos. También, las PC y RC pueden admitir y transportar ingredientes funcionales tales como antioxidantes, antimicrobianos, nutrimentos, sabores y colorantes para destacar la calidad, funcionalidad y seguridad de los alimentos, siendo esta actualmente una de las características más importantes en el uso de cubiertas (Falguera, Quintero, Jiménez, Muñoz, & Ibarz, 2011).

1.4.3 Propiedades físicas de las películas comestibles

Las propiedades físicas más importantes para las películas comestibles son: color, opacidad aparente, transparencia, solubilidad, permeabilidad al vapor de agua y a los gases (oxígeno, monóxido de carbono, etileno), y aquellas relacionadas con la resistencia mecánica (Roblejo, 2010). En este caso, se realizará la medición del espesor, la solubilidad y la permeabilidad al vapor de agua de las películas comestibles a base de almidón de yuca.

1.4.3.1 Espesor

Esta propiedad es rigurosamente controlada durante la elaboración de las películas, porque este parámetro influye sobre las propiedades mecánicas y de barrera (Liling, y otros, 2016).

Las películas y recubrimientos comestibles en su totalidad son de naturaleza hidrofílica. Existe una relación muy fuerte entre la permeabilidad al vapor del agua y el espesor de los films. A medida que el espesor se agranda, la resistencia a la transmisión de masa de la película o recubrimiento se incrementa (Hernández Cabrera, 2016).

1.4.3.2 Solubilidad

La solubilidad en agua es una propiedad física importante para determinar si la película se descompone con facilidad, a mayor solubilidad el film resiste menos al agua, es decir que son más susceptibles a degradación (Alvarado-González, y otros, 2011).

Una característica deseable en las películas comestibles es la resistencia al agua, dado que ella contribuye a mantener la integridad de las mismas, en caso que vayan a ser usadas para la conservación de alimentos de humedad intermedia a alta (Ozdemir & Floros, 2008).

1.4.3.3 Permeabilidad

Es la capacidad de un material para permitir que un fluido lo atravesase sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable (Carballo & Martínez, 2010).

Según Carballo & Martínez (2010), la velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de cuatro factores básicos:

A) La estructura del material: porosidad efectiva (huecos interconectados), tamaño de los poros, sección y espesor de la película.

B) La densidad del fluido considerado, que puede ser afectada por la temperatura.

C) La presión a que está sometido el fluido.

D) Tiempo de exposición.

1.4.3.4 Permeabilidad al vapor de agua

De acuerdo con la norma ASTM E96-00, la permeabilidad se define como la tasa de transmisión de vapor de agua a través de una unidad de área de material plano con espesor conocido, inducido por una diferencia de presión de vapor entre dos compartimentos separados por el material, bajo condiciones de presión atmosférica y temperatura definidas. Esta propiedad puede ser útil para entender los posibles mecanismos de transferencia de masa y las interacciones entre el vapor de agua y el polímero en las películas comestibles (Alzate, 2017).

La permeabilidad puede ser definida como el producto de la solubilidad y la difusividad cuando las leyes de Fick y Henry se aplican plenamente. Para la mayoría de las películas comestibles, el vapor de agua interactúa fuertemente con la estructura de la matriz biopolimérica, lo cual resulta en coeficientes de difusión y solubilidad dependientes de la fuerza impulsora (Bertuzzi, Castro Vidaurre, Armada, & Gottifredi, 2007).

La transferencia de vapor de agua, depende generalmente de la porción hidrofóbica de los componentes de la película o recubrimiento comestible, ya que, a través del movimiento del vapor de agua en los polímeros, se controla la transferencia de humedad desde el producto al medio ambiente, por lo que se busca que sea lo más lento posible. Se han realizado estudios (Bósquez-Molina & Vernon-Carter, 2005; Miranda, Cárdenas, López, & Lara-Sagahon, 2003) sobre la relación que existe entre la permeabilidad al vapor de agua y el tipo de componentes de la película o recubrimiento. Se ha observado relación entre el grosor de películas elaboradas con base de quitosano, y plastificantes como los polioles, glicerol, sorbitol, polietilenglicol encontrando que un incremento en el grosor aumenta la permeabilidad al agua (Trejo, Aragón, & Miranda, 2001; Arvanitoyannis, Kolokuris, Nakayama, & Aiba, 1997; Ramos-García, y otros, 2010).

1.4.4 Propiedades superficiales de las películas comestibles

Las propiedades superficiales de films y recubrimientos se refieren principalmente a la capacidad de cohesión y de adhesión a la superficie de los productos alimentarios. Estas dos propiedades dependen de la capacidad del polímero para formar enlaces intermoleculares numerosos y de gran resistencia, de modo que las cadenas de polímero queden fuertemente unidas. Para la mejora de estas propiedades se emplean plastificantes, que reducen el nivel de cohesión, y surfactantes, que mejoran la capacidad de adhesión a la superficie del alimento (Ramos, Fernandes, Silva, Pintado, & Malcata, 2012).

1.4.4.1 Adherencia

La adherencia describe la capacidad de unión a una determinada superficie. Es la atracción o unión física de dos sustancias, sobre todo la atracción de sustancias diferentes que se puede observar macroscópicamente. En cintas adhesivas, la adherencia es la unión que se produce entre el adhesivo y la superficie. Los adhesivos con gran capacidad de adherencia se unen especialmente bien a las subsuperficies. En el caso de la miel, su adherencia es bastante alta, ya que pega bastante bien (tesa, 2023).

Los emulsionantes también se pueden añadir para mejorar la adherencia, como una barrera a los gases y la humedad o para mejorar la compatibilidad, por ejemplo, para permitir una buena homogeneización de los aceites esenciales en matrices hidrofílicas (Lacroix, 2009).

1.4.5 Propiedades térmicas de las películas comestibles

Se trata de una técnica que permite determinar la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia, cuando es calentada o enfriada a velocidad constante. Es de utilidad para el conocimiento de la estabilidad térmica de un material, así como para la completa caracterización de sus transiciones. Uno de los primeros fenómenos térmicos que suele observarse al calentar un material, es un evento exotérmico, correspondiente a la relajación de las tensiones mecánicas introducidas durante el proceso de fabricación (Suriñach, Baro, Bordas, Clavaguera, & Clavaguera-Mora, 1992).

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) es una técnica de análisis térmico que está basada en la medición cuantitativa del calor absorbido o liberado por una muestra

cuando es calentada, enfriada o permanece a temperatura constante. La energía absorbida o liberada por la muestra se debe a que el material en estudio, sufre un cambio físico (fusión, cristalización, transición de estructuras cristalinas, etc.) o químico (síntesis, descomposición, etc.) y es compensada por la adición o saturación de una cantidad equivalente de energía eléctrica la cuál actúa a través de un calentador localizado en el porta-muestras (Kampf, 1986).

1.4.5.1 Resistencia térmica

La resistencia térmica es una propiedad del calor y una medida de la diferencia de temperatura por la cual un objeto o material resiste un flujo de calor (Connor, 2020).

1.5 Adhesivos alimentarios

Un adhesivo es un material que permite la unión entre dos superficies o sustratos en el que actúan dos fuerzas esenciales, la adhesión y la cohesión: la adhesión es la fuerza de unión que se produce entre el adhesivo y el sustrato y la cohesión es la resistencia ejercida en el interior del adhesivo, Según Oñoro (2005), existen una gran cantidad de adhesivos de diferentes naturalezas y origen.

Entre los distintos componentes que constituyen la formulación de los adhesivos se pueden destacar:

La base adhesiva.- Es el componente principal de un adhesivo y le proporciona muchas de las principales características como mojabilidad, propiedades de curado, la fuerza y la resistencia al medio ambiente. Es a menudo por peso, el componente mayoritario en la formulación y es el que le da el nombre al adhesivo.

El endurecedor o agente de curado.- Es una sustancia añadida con el fin de promover la reacción de polimerización y formar parte en ella por la combinación química con el polímero base.

El catalizador.- Es una sustancia que, añadida al adhesivo, promueve la reacción de polimerización, pero sin formar parte de esta, es decir permanecerá sin cambios durante la reacción. Los ácidos, bases, sales, compuestos de azufre y los peróxidos son ejemplos de catalizadores usados en la industria de adhesivos.

El acelerador, inhibidor, o retardador.- Se incorporan a veces en la formulación del adhesivo para controlar la velocidad de curado (acelerándola o decelerándola). Estos compuestos son importantes para el curado, así como para el tiempo de almacenamiento del adhesivo y la vida útil de este.

Los disolventes.- Son necesarios para dispersar el adhesivo a una consistencia que sea más fácil de aplicar sobre el sustrato, como con brocha o pulverización. También se utilizan para ayudar en la formulación del adhesivo mediante la reducción de la viscosidad del polímero base, de modo que la adición de otros componentes proporcione una mezcla uniforme. Estos deben evaporarse por completo antes de curar el adhesivo para evitar la formación de burbujas.

Las cargas.- Son sustancias que suelen tener algunas propiedades adhesivas y se añaden al adhesivo para reducir la concentración de otro componente del adhesivo y por tanto reducir el coste de la formulación general.

Los polvos de piedra.- Son sustancias no adhesivas que proporcionan en el adhesivo mejoras relacionadas con las propiedades de trabajo como expansión térmica,

viscosidad, resistencia termal...Entre los polvos más utilizados estarían la silica, alúmina, óxido de titanio, etc.

El respaldo.- Suele ser una tela fina, de tela o de papel utilizados para apoyar la composición del adhesivo semicurado para proporcionar una cinta o la película. El respaldo puede ser utilizado para fines funcionales o decorativos.

Plastificantes.- Son sustancias que forman parte de la formulación del adhesivo para proporcionarle flexibilidad y elongación al adhesivo, así como, reducir la viscosidad tras la fusión en los adhesivos termofusibles. Estos plastificantes actúan separando las cadenas del polímero y así, hacen posible su deformación.

Taquificantes.- Son promotores de adhesión que se añaden para aumentar la adhesión de los sustratos favoreciendo la resistencia al desgarro y disminuyendo la resistencia al corte.

Espesantes.- Son sustancias que mantienen un espesor del adhesivo razonable a través del ajuste de la viscosidad.

Antioxidantes y estabilizantes.- Son las sustancias que se añaden al adhesivo para retrasar el envejecimiento de este y por tanto alargar su vida útil.

Humectantes y tensioactivos.- se añaden para estabilizar la emulsión de tantos componentes que forman el adhesivo.

1.5.1 Clasificación de adhesivos

Los adhesivos se clasifican en la industria (Hernández Ruiz & Vergara Narvaez, 2008):

1. Según los materiales de los que están fabricados

- a) Sintéticos:** Fabricados con materiales sintéticos como por ejemplo polímeros.
- b) Naturales:** Fabricados por materiales derivados de productos animales y agrícolas. Un ejemplo de estos serían los adhesivos de almidón, objeto de estudio, que son adhesivos de origen agrícola derivados principalmente de la planta de yuca. El almidón se calienta, por lo general en disoluciones alcalinas, y después en frío se prepara la dispersión. Suelen ser solubles en agua. Estos se suelen aplicar para sustratos porosos (madera, papel y cartón) que se unen por la pérdida de agua.

2. La función que desempeñan

- a) Estructurales:** Capaces de soportar grandes fuerzas sin deformarse
- b) No estructurales:** Soportan pequeñas cargas y se degradan en periodos cortos de tiempo por exposición a condiciones ambientales como temperaturas adversas, compuestos químicos, etc.

3. Según la composición química

- a) Termoendurecibles:** Son los adhesivos que se curan mediante una reacción química irreversible llamada reticulada. En esta reacción se produce un entrecruzamiento por polimerización de dos polímeros lineales dando lugar a una estructura química reticulada rígida. Ejemplos de estos adhesivos son los epoxis y los uretanos.
- b) Termoplásticos:** Son la clase de adhesivos que se pueden formar sin necesidad de reacción química. Dentro de este grupo se encuentran los adhesivos termofusibles que son originalmente polímeros sólidos, que, para ser

curados, se calientan hasta derretirlos para posteriormente enfriarlos. Los adhesivos termoplásticos tienen en general poca resistencia a los disolventes o productos químicos. Ejemplos de estos adhesivos son los adhesivos termofusibles, acetatos de polivinilo (PVA), etc.

- c) Elastoméricos:** Están basados en resinas elastoméricas sintéticas o naturales con un alto grado de extensión y compresión. Recuperan rápidamente sus dimensiones y su forma inicial después de retirar la carga. Adhesivos de elastómeros pueden ser termoendurecibles o termoplásticos.

4. Según el modo de aplicación o reacción con el sustrato

Es decir, la manera en la que los adhesivos reaccionan o se solidifican:

- a) Reacción química:** Incluyendo la reacción con un endurecedor, así como mediante una fuente de energía exterior, como calor, radiación, catalizador... Dentro de este grupo nos encontramos con la mayoría de los adhesivos termoendurecibles. Por un lado, los formados por la reacción de condensación, generalmente con agua como subproducto (resinas fenólicas y aminoácidos), y los formados por polimerización por adición de un producto (poliésteres y resinas epóxicas). También se incluyen la mayoría de elastómeros y acrílicos que sólo necesitan la presión de contacto para ser efectivos.
- b) Pérdida de disolvente o de agua:** Una vez aplicado, el agua o disolvente, debe de ser eliminado, bien por evaporación en el aire o por difusión en una superficie porosa del sustrato. Por tanto, a menudo se utilizan para aplicaciones con sustratos porosos como la madera, papel, cuero, y tela.

- c) Por enfriamiento tras una fusión:** Se trata generalmente de adhesivos termoplásticos que, como se ha explicado anteriormente, se ablandan y se funden cuando se calientan y se endurecen tras el enfriamiento. Cuando el adhesivo se funde debe presentar una viscosidad baja y no debe enfriarse demasiado rápido para así lograr mojar el sustrato y que ambos se unan mejor.

5. Según la forma física

- a) Líquido**
- b) Pasta**
- c) Sólido (polvo, cintas, películas, etc.)**

1.5.2 Adhesivos en el envase alimentario

Actualmente, la mayoría de los envases que están en contacto con alimentos tienen adhesivo en su estructura. Los podemos encontrar de tres formas diferentes (Ashley, Cochran, & Allen, 1995):

- A.** Formando la estructura del envase por combinación con distintos materiales (generalmente polímeros, papel, cartón o vidrio), y en esta estructura se le conoce como laminado o multicapa.
- B.** Formando la geometría del envase (sellado de cajas, etc.)
- C.** En el etiquetado.

La forma más común de encontrar los adhesivos en el envase alimentario es del primer tipo; donde el adhesivo se aplica sobre la superficie total de los materiales o sustratos, uniéndolos y formando los materiales multicapa. Ejemplos de aplicaciones prácticas, son la laminación flexible de films, combinaciones papel-film, cartón-film, aluminio-film, cartón-aluminio, cartón-aluminio-plástico, sistemas rígidos multicapa

basados en plástico, sacos, bolsas, etc. (Ashley, Cochran, & Allen, 1995; Barnes, Sinclair, & Watson, 2007).

CAPÍTULO II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Elaboración de biopelículas

Para la elaboración de las biopelículas se preparó una solución formadora de película con diferentes biopolímeros: Almidón de yuca, fécula de maíz y quitosano (Cuadro 1). Se calentó la solución a 65 °C (Punto de gelatinización) por 30 minutos en una placa de cocción con agitador magnético (Marca: VELP SCIENTIFICA) y agitación constante. Se tomaron 20 ml de la mezcla y se vaciaron sobre tablas recubiertas de teflón delimitadas por un aro de PVC de 11.1 cm de diámetro interno. Las películas se secaron en una estufa de desecación (Marca: J.P. SELECTA) a 60°C durante 12-16 horas. Cada mezcla se realizó por duplicado, obteniendo 5 películas por mezcla.

Cuadro 1. Composición de las películas utilizando diferentes biopolímeros

Código	Película
M1	Almidón de yuca
M2	Almidón de yuca y fécula de maíz
M3	Almidón de yuca y quitosano
M4	Almidón de yuca, fécula de maíz y quitosano

2.2 Evaluación de propiedades físicas

En todas las biopelículas obtenidas se evaluó espesor, solubilidad, permeabilidad al vapor de agua y módulo de elasticidad. A continuación, se detalla cada una.

2.2.1 Espesor

La medición del grosor de las biopelículas se realizó de acuerdo al método de Orozco (2017).

El espesor fue medido en 8 posiciones aleatorias para cada película utilizando un vernier digital (marca: Traceable 3415MX), el promedio fue considerado como el espesor final en mm.

2.2.2 Solubilidad

La solubilidad de las biopelículas en agua se realizó según el método de Gheribi, y otros (2018).

Las muestras de biopelícula de 2 cm x 2 cm se secaron en horno de secado a 90 °C durante 24 h, se enfriaron a temperatura ambiente en un desecador, se pesaron en una balanza analítica de precisión (Marca: RADWAG AS 220.R2) para obtener su masa inicial (m_i); posteriormente, se sumergieron en 50 ml de agua destilada a 25 °C y 94 °C durante 30 min. Las piezas no disueltas se secaron en un horno de secado a 90 °C por 24 h y se pesaron para obtener la masa final (m_f). Se dejaron enfriar a temperatura ambiente. La solubilidad en agua de las biopelículas se calculó conforme la Ecuación 1.

$$S = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

S: solubilidad (%)

m_i : masa inicial (mg)

mf: masa final (mg)

2.2.3 Permeabilidad al vapor de agua

Según Carballo & Martínez (2010), las técnicas gravimétricas son comúnmente utilizadas para determinar la permeabilidad al vapor de agua en películas comestibles. Para evaluarla, se utiliza el método ASTM E96/ E96M-05. Existen dos técnicas, la que emplea desecante y la que utiliza agua, y esta última tiene dos variantes: agua y agua invertida. En este proyecto de investigación se utilizó la técnica que usa desecante.

Las muestras se colocaron en cajas Petri de 1.4 cm de altura por 5.4 cm de diámetro interno, se agregaron 8 g de Gel de Sílice (SiO_2 , marca Meyer) previamente desecado y llevado a peso constante. Se procedió a cubrir la biopelícula sobre la parte superior de la caja Petri y se selló con bandas de hule. Se dejaron dentro de la cámara de prueba (desecador), bajo condiciones establecidas de %HR (35 ± 2) y temperatura ($22^\circ\text{C} \pm 0.7$) utilizando un medidor de humedad relativa y temperatura (higrómetro digital marca HTC-2). La ganancia o pérdida de peso de cajas Petri se monitoreó en función del tiempo, obteniéndose datos suficientes para graficar la ganancia de peso vs tiempo. Los cambios de peso se registraron, mediante una balanza analítica de precisión (Marca: RADWAG AS 220.R2), cada hora durante 3 días registrando 6 pesos por día. El área de transferencia de vapor de agua a través de la película (πr^2) fue $2.2902 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. Se consideró una presión de vapor de saturación de 2,642.925832 Pa a 22°C .

Se utilizaron las siguientes ecuaciones (Ecuaciones 2, 3, 4 y 5) para calcular la determinación de la permeabilidad del vapor de agua de las biopelículas a base de almidón de yuca.

$$A_n = P_t - P_i \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

A_n : ganancia de peso en la caja Petri en un periodo determinado (Fracción).

P_t : peso de la caja Petri tomado en un tiempo desconocido (g).

P_i : peso inicial de la caja Petri en el ensayo (g).

$$WVT = \frac{dm}{dt} \times \frac{1}{A} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

WVT: índice de transferencia al vapor de agua o coeficiente de transmisión de vapor de agua (g/hm²).

dm/dt : diferencia de masa a través del tiempo (g/h).

A : área de la película expuesta (m²).

$$Pe = \frac{WVT}{S(R_1 - R_2)} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

Pe : permeanza (g/hm²Pa)

WVT: índice de transferencia al vapor de agua o coeficiente de transmisión de vapor de agua (g/hm²).

P_v: presión de vapor de saturación a la temperatura experimental (Pa)

R₁: humedad relativa de la cámara (Fracción)

R₂: humedad relativa interna de la caja Petri (Fracción)

$$PVA = Pe \times Gr \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Donde:

PVA: permeabilidad al vapor de agua (gmm/hm²Pa)

Pe: permeanza (g/hm²Pa)

Gr: grosor (mm)

2.2.4 Módulo de elasticidad (o de Young)

Se utilizó un texturómetro (Marca: INSTRON Serie 4442) equipado con dos mordazas de medición de carga.

Se cortaron muestras de biopelículas de 2.5 cm x 10 cm que se colocaron en las mordazas del equipo. Se utilizó una velocidad de 5 mm/min y un área de trabajo de 25 cm². Se graficó tensión vs deformación.

Para el cálculo del módulo de Young se utilizó la ecuación 6

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

E: módulo de elasticidad (MPa)

σ : tensión (MPa)

ε : deformación (Fracción)

2.3 Evaluación de propiedades térmicas

En todas las biopelículas obtenidas se evaluó la resistencia térmica. A continuación, se detalla la metodología.

2.3.1 Resistencia térmica

La resistencia térmica de las biopelículas en agua se ensayó por duplicado. Para la evaluación, se consideraron las siguientes temperaturas: 25°C y 94°C.

Las muestras de biopelícula de 2 x 2 cm se pesaron (m_i) en una balanza analítica de precisión, se colocaron en vasos de precipitados de 50 ml de agua destilada con la ayuda de un agitador digital con calefacción a la temperatura correspondiente por 30 min, se secaron en un horno de secado a 90°C durante 24 horas y se pesaron (m_f) después de enfriar en un desecador a temperatura ambiente.

La resistencia térmica de las películas se calculó con la siguiente ecuación.

$$RT = 100 - S \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

RT: resistencia Térmica (%)

S: solubilidad (%)

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1 Obtención de las biopelículas

Todas las mezclas elaboradas lograron formar películas, diferenciándose por su espesor, color, facilidad de desmoldeo, tiempo de secado, apariencia, número de películas obtenidas y presencia de burbujas.

En la figura 2 se muestran las películas formadas. Se puede observar que la película M1 [Figura 2 a)] presentó una capa delgada con una apariencia lisa color transparente, presentó ligeros problemas de desmoldeo, presencia mayor de burbujas y espesor de 0.0904 mm. Se obtuvieron 5 películas por ensayo y un tiempo de secado de 16 horas.

La película M2 [Figura 2 b)] presentó una capa delgada con una apariencia lisa color transparente con un poco de opacidad, tuvo la facilidad de desmoldeo, presencia mínima de burbujas, con un espesor de 0.0787 mm. Se obtuvieron 4 películas por ensayo y un tiempo de secado de 16 horas.

La película M3 [Figura 2 c)] presentó una capa delgada con una apariencia lisa color transparente-amarillento, tuvo la facilidad de desmoldeo, presencia mínima de burbujas, con un espesor de 0.0487 mm. Se obtuvieron 4 películas por ensayo y un tiempo de secado de 16 horas.

La película M4 [Figura 2 d)] presentó una capa delgada con una apariencia lisa color transparente-amarillento, tuvo la facilidad de desmoldeo, presencia mínima de burbujas, con un espesor de 0.0583 mm. Se obtuvieron 4 películas por ensayo y un tiempo de secado de 16 horas.

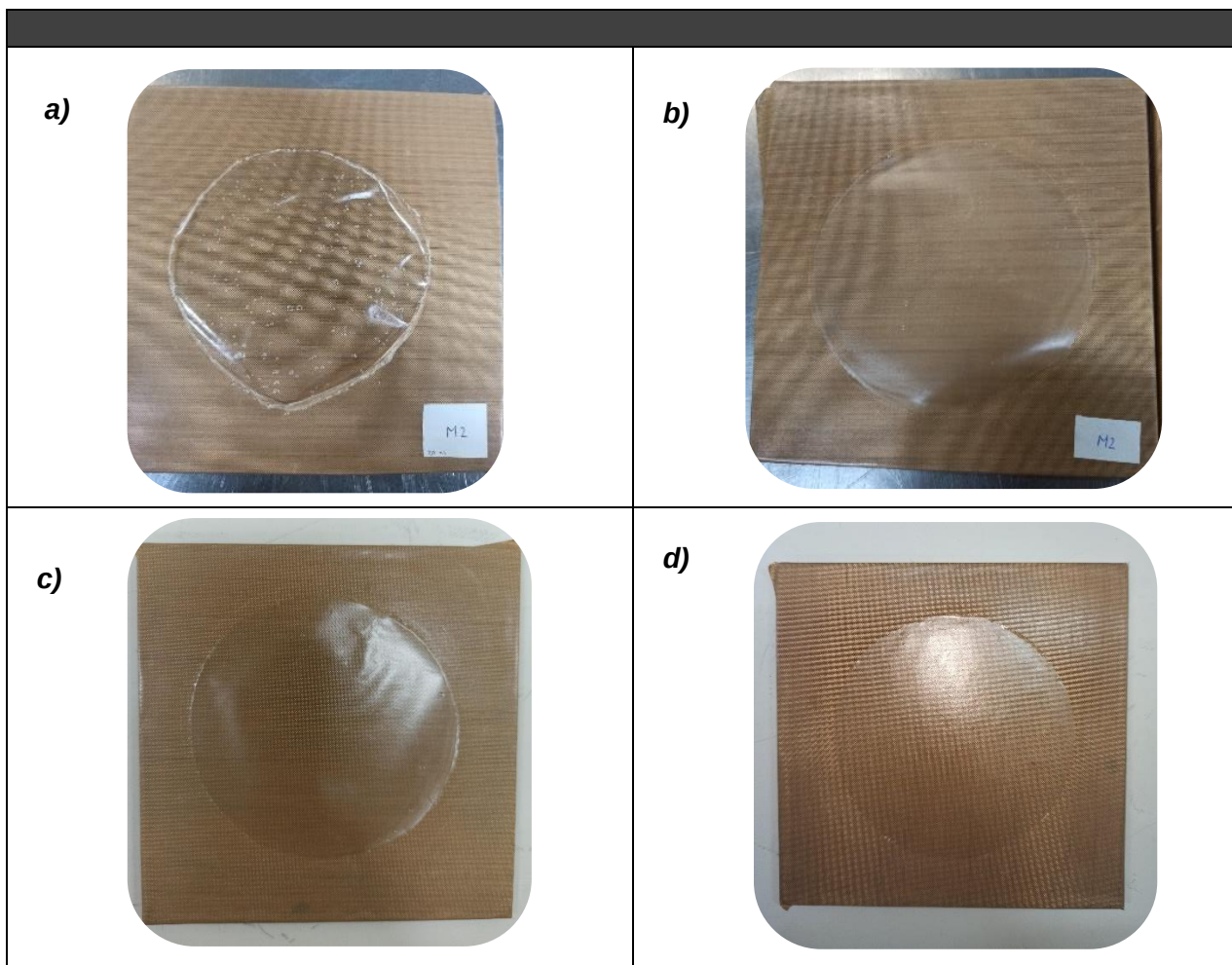


Figura 2. Biopelículas a base de almidón de yuca. a) Película M1, b) Película M2, c) Película M3, d) Película M4.

En el cuadro 2, se muestra el resumen de las características de las biopelículas, lo cual se consideró la apariencia, el espesor, las películas formadas y el tiempo de secado.

Cuadro 2. Características de las películas obtenidas.

Película	Apariencia	Espesor (mm)	Películas formadas	Tiempo de secado (h)
M1	Lisa, color transparente	0.0904	5	16
M2	Lisa, color transparente opaca	0.0787	4	16
M3	Lisa, color transparente-amarillento	0.0487	4	16
M4	Lisa, color transparente-amarillento	0.0583	4	16

Estas características son similares a las películas formuladas por Vásquez-Luna, Santiago, Rivadeneyra-Domínguez & Díaz-Sobac (2019), quienes utilizaron almidón de yuca como material base. Las películas con 3 % de almidón nanoestructurado (PN) fueron más translúcidas, con mejor flexibilidad y menos frágiles, que las películas con 3 % de almidón sin nanoestructurar (PSN), ambas contenían 6 % de glicerol, además de que las PN se desprendieron fácilmente de las placas donde se formaron.

3.1.1 Formulaciones de las biopelículas

El cuadro 3 muestra las cuatro formulaciones empleadas para la formación de biopelículas, variando en ellas tanto la concentración de almidón como la ausencia o presencia de quitosano.

Cuadro 3. Formulaciones de películas con diferentes biopolímeros.

Código	Película	Solución formadora de biopelículas	Solución complementaria
M1	Almidón de yuca	Almidón de yuca 4% p/v Glicerina 1% p/v Agua destilada	
M2	Almidón de yuca y fécula de maíz	Almidón de yuca 2% p/v Fécula de maíz 2% p/v Glicerina 1% p/v Agua destilada	
M3	Almidón de yuca y quitosano	Almidón de yuca 4% p/v Glicerina 1% p/v Agua destilada	Quitosano 1% p/v en solución ácido acético 1% v/v
M4	Almidón de yuca, fécula de maíz y quitosano	Almidón de yuca 2% p/v Fécula de maíz 2% p/v Glicerina 1% p/v Agua destilada	Quitosano 1% p/v en solución ácido acético 1% v/v

3.2 Evaluación de propiedades físicas

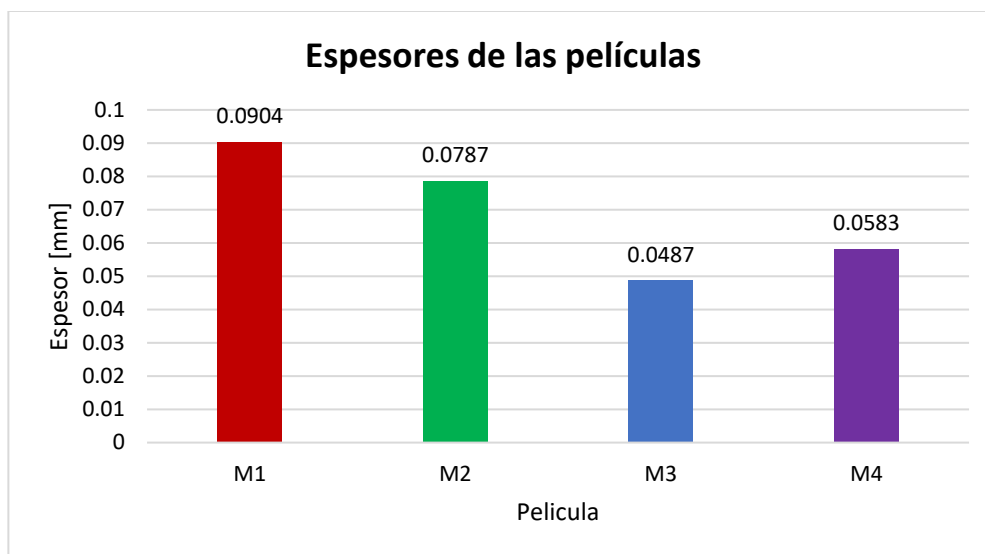
A continuación, se muestran los resultados obtenidos del espesor, solubilidad, permeabilidad al vapor de agua y módulo de elasticidad de las películas obtenidas.

3.2.1 Espesor

En cuadro 4 se muestran los promedios de los resultados de espesor (Ver Anexo A) para cada prueba.

Cuadro 4. Espesores obtenidos de las biopelículas formadas.

Película	Espesor (mm)
M1	0.0904
M2	0.0787
M3	0.0487
M4	0.0583



Gráfica 1. *Espesor de las películas formadas.*

Por lo que se observa en la gráfica 1 la película M1 fue la que mayor espesor obtuvo (0.0904 mm), seguida de la película M2 (0.0787 mm). Así mismo se observa que la variable que disminuyó el espesor fue la presencia de quitosano, dando como resultado que las películas M3 y M4 obtengan espesores de 0.0487 y 0.0583 mm, respectivamente.

Otro factor que puede afectar el espesor de las películas es la concentración de plastificante, esto fue observado por Shimazu, Mali & Grossmann, (2007), quienes reportaron que el espesor de la película biodegradable de almidón de yuca varió de 0.07 a 0.10 mm, mientras que las películas sin plastificante tenían un espesor de 0.07 mm y, a medida que aumentaba el contenido de plastificante, los espesores de las películas llegaron a 0.10 mm.

3.2.2 Solubilidad

En el Cuadro 5, se muestran los promedios de los resultados (Ver Anexo B) para llegar a los valores de solubilidad en agua de cada película que se realizaron en la prueba (Figura 3).

Cuadro 5. Solubilidad de biopelículas a base de yuca.

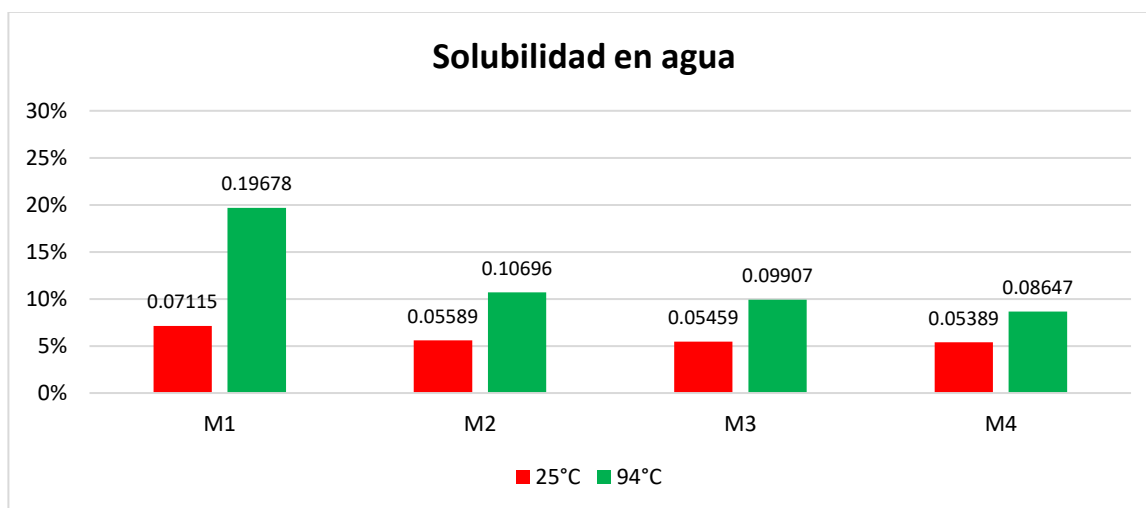
Película	%Solubilidad (T=25 °C)	%Solubilidad (T=94 °C)
M1	7.115	19.678
M2	5.589	10.696
M3	5.459	9.907
M4	5.389	8.647



Figura 3. Prueba de solubilidad de las películas en agua.

A 94 °C el porcentaje de materia soluble en agua disminuye al adicionar fécula de maíz y quitosano, como es el caso de la película M3 (9.907%) y M4 (8.647%) que presentaron menores valores de solubilidad, por el contrario, la película M1 (19.678%)

presenta un mayor porcentaje de materia soluble en agua. Por lo que se puede decir que la película M4 presenta mayor resistencia al agua.



Gráfica 2. Solubilidad de las películas formadas.

Según Aristizábal & Sánchez (2007) los almidones obtenidos deben encontrarse en un índice de solubilidad en agua de entre 0.27 – 12.32 %, debido a que, si presentan una alta solubilidad, los almidones al enfriarse tienden a formar pastas delgadas, por lo que tendría poca estabilidad siendo indicios de un almidón de baja calidad y no apropiado para el proceso. En este caso, las películas obtenidas a partir del almidón de yuca, fécula de maíz y quitosano se encuentran dentro de los parámetros fijados, siendo un almidón de buena calidad y en condiciones óptimas para el uso en el proceso.

3.2.3 Permeabilidad al vapor de agua

En base con los cálculos realizados de la permeabilidad al vapor de agua (Figura 4), se muestra el resumen (Cuadro 6) de los resultados obtenidos de permeabilidad al vapor de agua de cada biopelícula (Ver Anexo C).

Cuadro 6. Permeabilidad al vapor de agua de las películas formadas.

Película	dm/dt [g/h]	WVT [g/hm ²]	Pe [g/hm ² Pa]	PVA [g/mhPa]
M1	0.0057	2.2897	2.4754x10 ⁻³	2.2377x10 ⁻⁷
M2	0.0064	2.5709	2.7794x10 ⁻³	2.1874x10 ⁻⁷
M3	0.0004	0.1607	1.7371x10 ⁻⁴	8.4597x10 ⁻⁹
M4	0.0003	0.1205	1.3028x10 ⁻⁴	7.5955x10 ⁻⁹



Figura 4. Prueba de permeabilidad al vapor de agua de las películas.

De acuerdo al Cuadro 6, las diferencias de masa a través del tiempo (dm/dt) tuvieron valores similares entre las películas M1 y M2, así mismo, las películas M3 y M4. Sin

embargo, la película M2 presentó mayor pendiente de la recta obtenida. En el caso del índice de transferencia al vapor de agua (WVT) calculadas con la Ecuación 3, el área de aplicación de cada ensayo era igual, de tal manera que en la película M2 obtuvo un mayor índice de transferencia al vapor de agua. En los resultados de permeanza (Pe), los valores continúan de manera proporcional, ya que se multiplicó a una determinada presión a la misma temperatura del ensayo. Por lo tanto, la película M4 obtuvo una baja permeanza. Por último, en la permeabilidad del vapor de agua (PVA), los resultados varían debido al grosor de cada película, recordando que la película M1 obtuvo el mayor espesor. Sin embargo, al observar los resultados de permeanza multiplicado por el grosor de la película, se puede ver que la película M1 obtuvo una mayor permeabilidad al vapor de agua con un valor de 2.2377×10^{-7} g/mhPa. Por otra parte, la película M4 mostró una baja permeabilidad al vapor de agua con un valor de 7.5955×10^{-9} g/mhPa.

Los resultados de esta prueba se pueden comparar con los reportados en los estudios de Müller, Yamashita, & Laurindo (2008) y de Vega & Chávez (2009), los cuales reportan resultados de permeabilidad al vapor de agua entre 8.3988×10^{-7} y 1.039×10^{-6} g/mhPa en películas de almidón.

Las variaciones en los valores de permeabilidad se deben a las diferentes concentraciones de almidón de yuca en las biopelículas y a la presencia de quitosano.

3.2.4 Módulo de elasticidad (o de Young)

La caracterización de propiedades mecánicas se evaluó para las cuatro formulaciones analizando el efecto en cada una. Por medio del texturómetro (Figura 5) se hallaron los parámetros de fuerza y distancia de cada una de las películas.

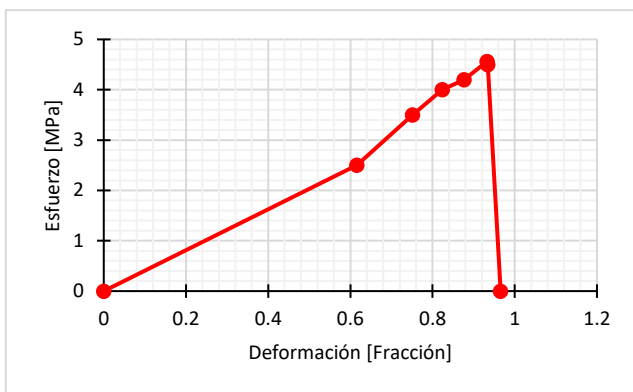


Figura 5. Texturómetro INSTRON Serie 4442.

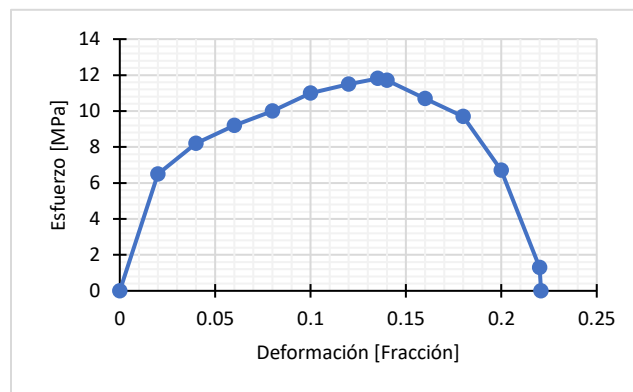
Las anteriores pruebas se realizan para evaluar que tan rígido o elástico es la biopelícula. El módulo de Young se encarga de probar la rigidez de la película.

En la gráfica 3 se muestran los diagramas esfuerzo-deformación de las películas obtenidas. La película M1 [Gráfica 3 a)] fue la película más elástica al obtener una deformación del 96.57% y esfuerzo máximo del 4.564 MPa al momento de su ruptura.

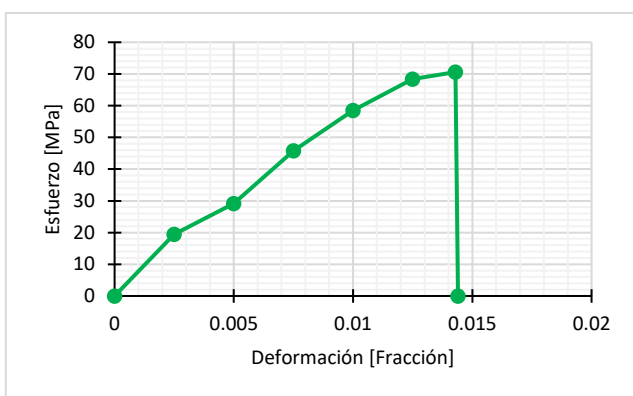
La película M2 [Gráfica 3 b)] presentó una deformación del 22.08% esfuerzo máximo de 11.81 MPa. Aquí se observa que la adición de fécula de maíz aumenta en menor medida la rigidez de las películas.



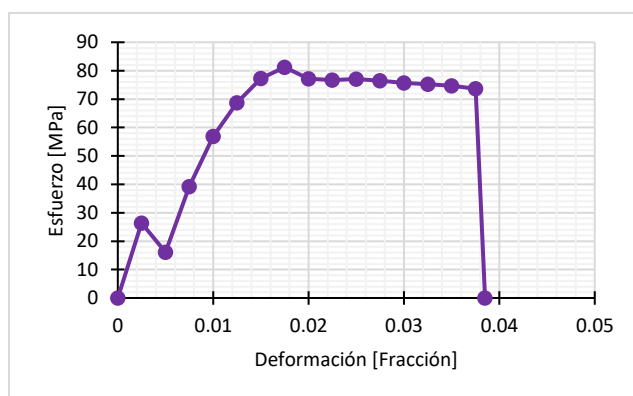
a)



b)



c)

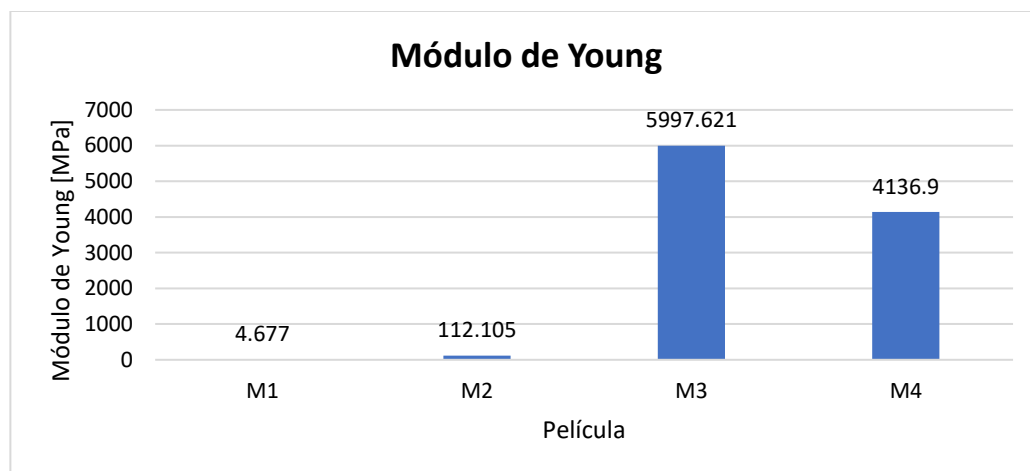


d)

Gráfica 3. Diagrama Esfuerzo-Deformación de las películas formadas: a) Película M1, b) Película M2, c) Película M3, d) Película M4.

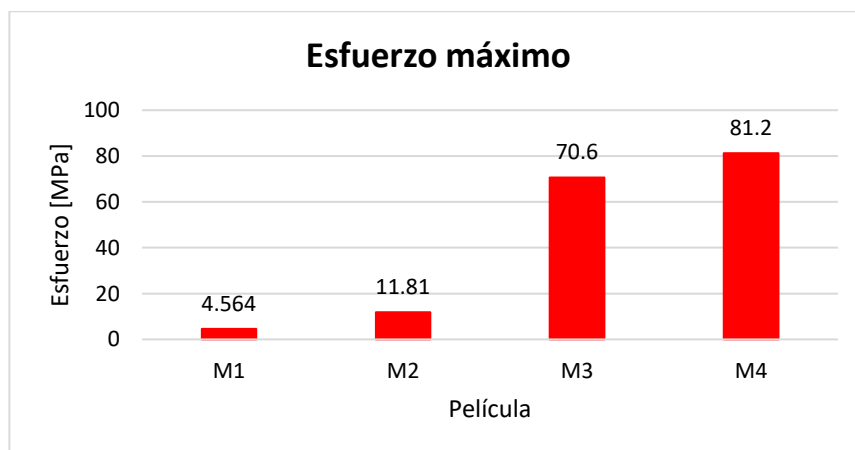
A las películas M3 y M4 [Gráfica 3 c) y d)] se les adicionó quitosano a la formulación lo cual representó un cambio significativo en las propiedades mecánicas. Las películas se volvieron muy rígidas, esto se observa en sus respectivas graficas donde cada una obtuvo una deformación muy baja (1.44% y 3.85%) y un esfuerzo máximo muy alta (70.6 MPa y 81.2 MPa).

Así mismo se puede observar en la gráfica 4 que ocurre un cambio en las propiedades cuando se adiciona quitosano, difieren dependiendo la concentración en la que se encuentren. Al adicionar quitosano el módulo de Young aumenta.



Gráfica 4. Módulo de Young para las cuatro películas.

La película que presente el valor más alto de esfuerzo máximo, es la que posee el mayor límite de elasticidad de las películas antes de romperse (Gráfica 5). La película M4 presentó el valor más alto.



Gráfica 5. Esfuerzo máximo para las cuatro películas.

En el cuadro 7 se resumen los resultados obtenidos (Ver anexo D) en las pruebas mecánicas en el cual se puede ver el efecto del quitosano en las películas. Además, las películas que obtuvieron un valor de esfuerzo máximo mayor (81.2 MPa) y módulo

de Young (5997.621 MPa) fueron las películas M4 y M3 respectivamente. La formulación que tuvo pocos efectos sobre su resistencia fue la película M1 la cual resulto ser la más elástica.

Cuadro 7. Módulo de Young

Película	Esfuerzo máximo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
M1	4.564	4.677
M2	11.81	112.105
M3	70.6	5997.621
M4	81.2	4136.9

Robayo-Gallego (2018) realizó biopelículas a base de almidón de yuca adicionando ácido cítrico y Antocianina en cuatro formulaciones diferentes, en dicho proyecto reportó los siguientes resultados en la caracterización de propiedades mecánicas referente al módulo de Young y esfuerzo máximo (Figura 6 y 7).

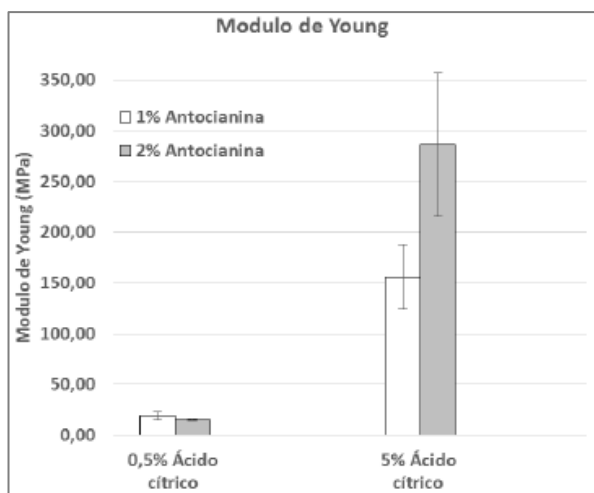


Figura 6. Módulo de Young para las cuatro formulaciones (Robayo Gallego, 2018).

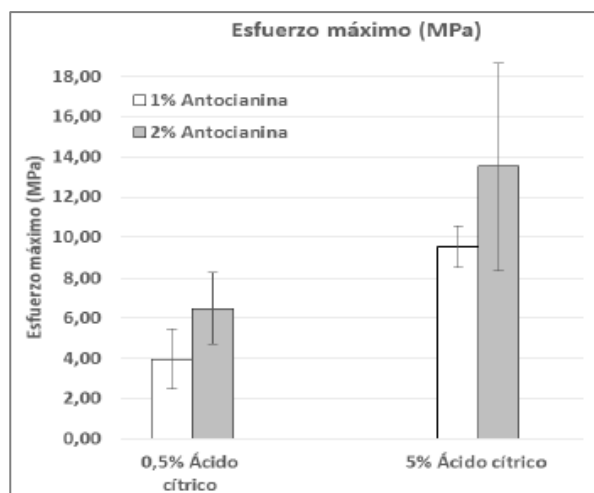


Figura 7. Esfuerzo máximo para las cuatro formulaciones (Robayo Gallego, 2018).

En esta investigación explica que hay un cambio en las propiedades cuando se adiciona ácido cítrico, difieren dependiendo la concentración en la que se encuentren. Al adicionar ácido al 5% el esfuerzo máximo y el módulo de Young aumentan. En contraste, la deformación máxima para las películas cambia, siendo de mayor elasticidad las de formulación al 0.5% comparada con las de 5%. El aumento del módulo de Young, esfuerzo máximo y elongación generan rigidez en la película. En contraste, a las formulaciones con 0.5% de ácido se genera un efecto de deformación plástica (menor módulo de Young y esfuerzo máximo) alcanzando un alto porcentaje de elongación al romperse. Por esta razón, se presentan dos efectos con el ácido, por un lado, un plastificante a 0.5% y, por otro lado, antiplastificante al 5%.

3.3 Evaluación de propiedades térmicas

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la prueba de resistencia térmica.

3.3.1 Resistencia térmica

Considerando los cálculos efectuados de la resistencia térmica de las biopelículas, el Cuadro 8 muestra los resultados de la prueba de resistencia térmica de cada película obtenida a distintas temperaturas (Figura 8).

Cuadro 8. Resistencia térmica de las películas formadas.

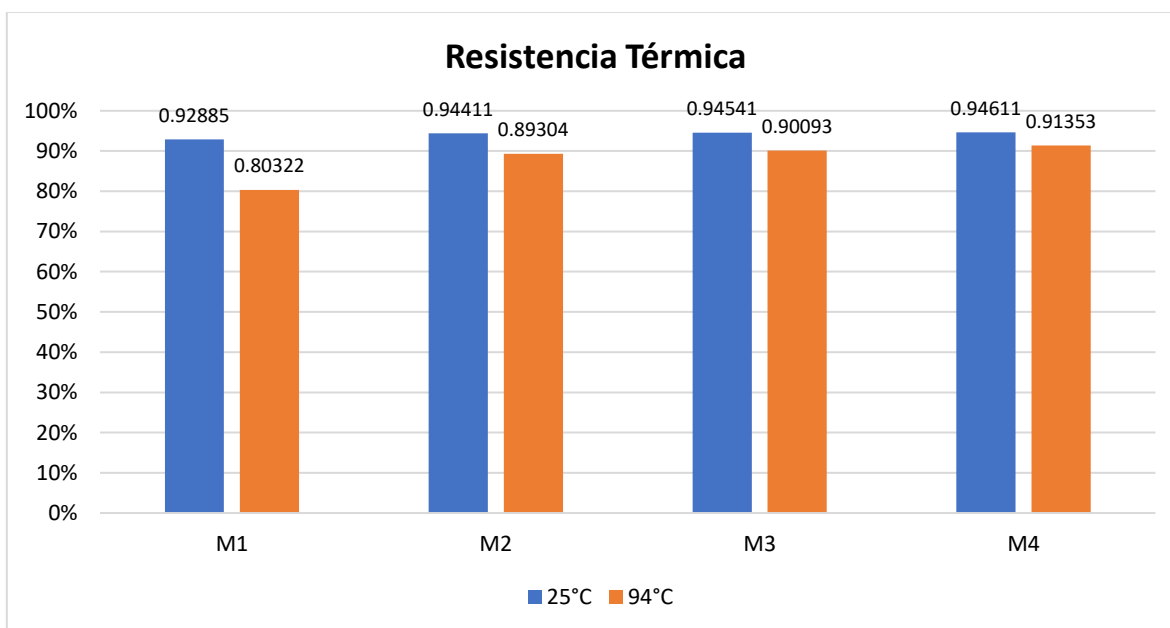
Película	RT (%) a 25 °C	RT (%) a 94 °C
M1	92.885	80.322
M2	94.411	89.304
M3	94.541	90.093
M4	94.611	91.353



Figura 8. Prueba de resistencia térmica de las películas en agua.

De las cuatro formulaciones de biopelículas evaluadas, a 25 °C, la película M1 presentó la menor resistencia térmica, seguida de la formulación M2, M3 y M4, con valores de 92.885%, 94.411%, 94.541 y 94.611%, respectivamente. Para la temperatura de 94 °C se observó el mismo comportamiento, sin embargo, los valores obtenidos, de manera general, fueron más bajos, teniendo 80.322%, 89.304%, 90.093% y 91.353% para las películas M1, M2, M3 y M4, respectivamente.

En la Gráfica 6, se observa el comportamiento de la resistencia térmica de cada película a dos diferentes temperaturas.



Gráfica 6. Resistencia térmica de las películas.

En una investigación previamente realizada en esta institución por Neri-Rojas (2022), el cual elaboró biopelículas a base de mucilago de nopal obtuvo los siguientes resultados en la prueba de resistencia térmica a las temperaturas de 50, 60 y 95 °C.

La película M1-0.8 presentó una menor resistencia a una temperatura de 50 °C con un valor de 29.1653% al igual que la película M2-1.0 obtuvo un 36.7033% de resistencia térmica mientras que la película M3-1.5 presentó una mayor resistencia térmica a la misma temperatura con 43.5723%. En el caso de la temperatura de 60 °C, la película M1-0.8 disminuyó el valor de la resistencia térmica con un valor de 28.5049 %, de igual manera, las películas restantes tuvieron el mismo efecto dando

32.1832% en la película M2-1.0 y 38.3392% de resistencia térmica en la película M3-1.5. Sin embargo, en la temperatura de ebullición del agua (95 °C), la película M1-0.8 presentó un valor de 15.2910 %, la película M2-1.0 obtuvo un 19.3701% de resistencia térmica y en la película M3-1.5 obtuvo un valor de 24.0659 %, esos últimos valores nos indica que no son muy resistentes a alta temperatura.

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES

Los biopolímeros empleados (fécula de yuca, Maizena, quitosano y glicerina) son buenos formadores de biopelículas. Las mezclas M3 y M4 mostraron buena apariencia con la facilidad de desmoldeo y presencia mínima de burbujas.

La prueba de permeabilidad al vapor de agua muestra que las formulaciones M3 y M4 presentaron menores valores de permeabilidad al vapor de agua con 8.4597×10^{-9} g/mhPa y 7.5955×10^{-9} g/mhPa, respectivamente; por otra parte, la formulación con mayor valor de permeabilidad al vapor de agua fue la M1 con un valor de 2.2377×10^{-7} g/mhPa.

La película M1 resultó ser la más elástica con un módulo de Young de 4.677 MPa y recibiendo un esfuerzo máximo de 4.564 MPa. Por otra parte, la película M3 es la más rígida con un módulo de Young de 5997.621 MPa y un esfuerzo máximo de 70.6 MPa. Se pudo observar que el quitosano si tiene un efecto significativo en la rigidez de la película.

La película M1 resultó ser la más soluble (19.678 %), mientras que la película M3 y M4 resultaron ser las menos solubles, con 9.907 % y 8.647 %, respectivamente, a una temperatura de 94 °C.

La resistencia térmica disminuye, en función de la concentración de almidón de yuca, a medida que la temperatura del agua aumenta. Las cuatro formulaciones presentaron una buena resistencia térmica (>90%) a una temperatura de 25°C. La película M4 obtuvo un valor mayor (94.611%) seguida de la M3 (94.541%). Sin embargo, al llegar a la temperatura de ebullición del agua (94°C) la resistencia térmica de las películas

M1 y M2 disminuyen con un valor de 80.322% y 89.304%, respectivamente. A la misma temperatura, las películas M3 y M4 que contienen quitosano en su formulación son las que mantuvieron buena resistencia térmica con valores de 90.093% y 91.353%, respectivamente.

CAPITULO V. REFERENCIAS

- Alvarado, J., Arancibia, M., & Almeida, A. (2005). Desarrollo y Caracterización de Películas de Quitosano. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 39-47.
- Alvarado-González, J., Dominguez-Fernández, R., Welti-Chanes, J., Calderón, G., Garibay-Febles, V., & Chanona-Pérez, J. (2011). Structural and physicochemical characterization of edible films elaborated with Aloe vera (barbadensis Miller) and gellan gum. *Bioprocessing and Food Quality Management*, 18-20.
- Alzate, P. (2017). *Caracterización fisicoquímica de películas comestibles elaboradas con almidón de mandioca nativo o modificado e hidroxipropil metilcelulosa (HPMC) y actividad antimicrobiana de agentes preservadores retenidos en ellas*. [Tesis de maestría, Universidad de Buenos Aires]. Obtenido de https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n6429_AlzateCalderon
- Andersen, P. J., & Hodson, S. (2001). Thermoplastics starch compositions incorporating a particulate filler component. *US6231970*.
- Aristizábal, J., & Sánchez, T. (2007). *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca*. Roma: Boletín de servicios agrícolas de la FAO.
- Arvanitoyannis, I., Kolokuris, I., Nakayama, A., & Aiba, S. (1997). Preparation and study of novel biodegradable blends based on gelatinized starch and 1,4-trans-polyisoprene (gutta percha) for food packaging or biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, 291-302. doi:[https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(97\)00085-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(97)00085-4)

- Arvanitoyannis, I., Nakayama, A., & Aiba, S.-i. (1998). Edible films made from hydroxypropyl, starch and gelatin and plasticized by polyols and water. *Carbohydrate Polymers*, 105-119.
- Ashley, R. J., Cochran, M. A., & Allen, K. W. (1995). Adhesives in Packaging. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 101-108.
- Ávila-Sosa, R., Palou, E., Munguía, M. T., Nevárez-Moorillón, G. V., Cruz, A. R., & López-Malo, A. (2012). Antifungal activity by vapor contact of essential oils added to amaranth, chitosan, or starch edible films. *International Journal of Food Microbiology*, 66-72. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2011.10.017
- Bargues, G. (2022). *Yuca: qué es, propiedades, beneficios y cómo tomarla*. Obtenido de BON VIVEUR web site: <https://www.bonviveur.es/gastroteca/la-yuca-el-manjar-americano-lleno-de-energia>
- Barnes, K. A., Sinclair, C. R., & Watson, D. H. (2007). Chemical migration and food contact materials:. *Woodhead Publishing Limited*, 320-331.
- Bertuzzi, M., Castro Vidaurre, E., Armada, M., & Gottifredi, J. (2007). Water vapor permeability of edible starch based films. *Journal of Food Engineering*, 972-978.
- Bósquez-Molina, E., & Vernon-Carter, E. (2005). Efecto de plastificantes y calcio en la permeabilidad al vapor de agua de películas a base de goma de mezquite y cera de candelilla. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 157-162. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62040203>

- Burdock, G. A. (2010). *Fenaroli's handbook of flavor ingredients*. Taylor and Francis Group.
- Cagri, A., Ustunol, Z., & Ryser, E. T. (2004). Antimicrobial edible films and coatings. *Journal of Food Protection*, 833-848. doi:10.4315/0362-028X-67.4.833
- Carballo, E., & Martínez, E. (2010). *Determinación de la permeabilidad al vapor de agua por el metodo ASTM E96/E 96M-05 en películas de quitosano*. [Tesis de licenciatura, Universidad de El Salvador]. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2497/>
- Carmona Gallego, J. A., Cordobés, F., Guerrero Conejo, A. F., Martínez, I., & Partal López, P. (2007). Influencia del pH y de la fuerza iónica sobre la gelificación térmica de proteínas de la yema de huevo. *Grasas y aceites*, 289-296. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11441/54857>
- Cholwasa, B., Duangdao, A., & Kawee, S. (2003). Preparation and properties evaluation of chitosan coated cassava starch films. 61-71.
- Connor, N. (2020). *¿Qué es la resistencia térmica?* Obtenido de Thermal engineering web site: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-resistencia-termica-resistividad-termica-definicion/>
- Del-Valle, V., Hernández-Muñoz, P., Guarda, A., & Galotto, M. (2005). Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life. *Food Chemistry*. doi:10.1016/j.foodchem.2004.07.002

- Devlieghere, F., Vermeulen, A., & Debevere, J. (2004). Chitosan: antimicrobial activity, interactions with food components and applicability as coating on fruit and vegetables. *Food Microbiol*, 703-714.
- Dhawan, S., Dhawan, K., Varma, M., & Sinha, V. R. (2005). Applications of poly(ethylene oxide) in drug delivery systems. *Pharmaceutical technology*, 82-96.
- Duprat, F., Gallant, D., Guilbot, A., Mercier, C., & Robin, J. P. (1980). Les polymeres végétaux. 176-231.
- Escobar, D., Sala, A., Silvera, C., Harispe, R., & Márquez, R. (2009). Películas biodegradables y comestibles desarrolladas en base a aislado de proteínas de suero lácteo: estudio de dos métodos de elaboración y del uso de sorbato de potasio como conservador. *Revista del Laboratorio tecnológico de Uruguay*, 33-36.
- Espino-Díaz, M., De Jesús Ornelas-Paz, J., Martínez-Téllez, M., Santillán, C., Barbosa-Cánovas, G., Zamudio-Flores, P., & Olivas, G. (2010). Development and characterization of edible films based on mucilage of *Opuntia ficus-Indica* (L.). *Journal of Food Science*, 347-352. doi:10.1111/j.1750-3841.2010.01661.x
- Falguera, V., Quintero, P., Jiménez, A., Muñoz, J. A., & Ibarz, A. (2011). Edible films and coatings: Structures, active function and trends in their use. *Trends in Food Science & Technology*, 7. doi:10.1016/j.tifs.2011.02.004
- Gheribi, R., Puchot, L., Verge, P., Jaoued-Grayaa, N., Mezni, M., Habibi, Y., & Khwaldia, K. (2018). Development of Plasticized Edible Films from *Opuntia*

- ficus-indica Mucilage: A Comparative Study of Various Polyol Plasticizers. *Carbohydrate Polymers*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.085>
- Gontard, N., Guilbert, S., & Cug, J. L. (1993). Water and Glycerol as Plasticizers Affect Mechanical and Water Vapor Barrier Properties of an Edible Wheat Gluten Film. *Journal of food science*. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb03246.x>
- Hermida, É. (2011). *Polímeros*. Buenos Aires: Ministerio de Educación.
- Hernández Cabrera, K. (2016). *Formulación y Caracterización de Películas Comestibles de Almidón de Papa Nativo y Modificado*. [Tesis de maestria, Universidad Veracruzana].
- Hernández Ruiz, M., & Vergara Narvaez, A. (2008). Elaboración y evaluación de un adhesivo a partir del almidón de yuca nativo, (*Manihot sculenta* crantz), variedad M-TAI, utilizando hidroxido de sodio como agente hidrolizante. *Universidad de Sucre*.
- Howeler, H. (2012). *The cassava handbook: A reference manual based on the Asian Regional Cassava Training Course, held in Thailand*. Bangkok, Tailandia: Centro internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- Jansson, A., & Järnström, L. (2005). Barrier and mechanical properties of modified starches. *Cellulose*, 423-433.
- Jaworek, A. T., & Sobczyk, A. T. (2008). Electrospraying route to nanotechnology: an overview. *Journal of electrostatics*, 197-219. doi:<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2007.10.001>

- Kampf, G. (1986). Characterization of Plastics by Physical Methods. *Hanser publishers*.
- Kondo, T., & Sawatari, C. (1994). Inter molecular hydrogen bonding in cellulose/polyethylene oxide blends: thermodynamic examination using 2, 3-di-o- and 6-o-methyl celluloses model compounds. *Polymer*, 4423-4428.
- Krochta, J., & De Mulder-Johnston, C. (1997). Edible and biodegradable polymer films: challenges and opportunities. *Food Technology*, 61-77.
- Kumar, Y., Shukla, P., Singh, P., Prabhakaran, P. P., & Tanwar, V. K. (2014). Bioplastics. A perfect tool for eco-friendly food packaging. *Journal of Food Product Development and Packaging*, 01-06.
- Lacroix, M. (2009). Mechanical and Permeability Properties of Edible Films and Coatings for Food and Pharmaceutical Applications Trans. *Edible Films and Coatings for Food Applications*, 347-366.
- Liling, G., Di, Z., Jiachao, X., Xin, G., Xiaoting, F., & Qing, Z. (2016). Effects of ionic crosslinking on physical and mechanical properties of alginate mulching films. *Carbohydrate Polymers*, 259-265.
- Long, Y., Coombs, S., Christie, G., & Bruce, Y. (2008). Biodegradable polymer. *US7326743*.
- Mármol, Z., Páez, G., Rincón, M., Araujo, K., Aiello, C., Chandler, C., & Gutiérrez, E. (2011). Quitina y Quitosano polímeros amigables. Una revisión de sus aplicaciones. *Revista Tecnocientífica*, 53-58.

- Mestres, C. (1996). Los estados físicos del almidón. En: conferencia internacional sobre Almidón. Propiedades físico-químicas, funcionales y nutricionales. Usos. 1-16.
- Miranda, S., Cárdenas, G., López, D., & Lara-Sagahon, A. (2003). comportamiento de películas de Quitosán compuesto en un modelo de almacenamiento de aguacate. *Revista de la Sociedad Química de México*, 331-336. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rsqm/v47n4/v47n4a8.pdf>
- Monroy-Villagrana, A., Cano-Sarmiento, C., Alamilla-Beltrán, L., Hernández-Sánchez, H., & Gutiérrez-López, G. F. (2014). Coupled taguchi-rsm optimization of the conditions to emulsify a-tocopherol in an Arabic gum maltodextrin matrix by microfluidization. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 679-688. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v13n3/v13n3a3.pdf>
- Müller, C. M., Yamashita, F., & Laurindo, J. B. (2008). Evaluation of the effects of glycerol and sorbitol concentration and water activity on the water barrier properties of cassava starch films through a solubility approach. *Carbohydrate Polymers*, 85-86.
- Nabor, A. (2020). *Qué es la fécula de maíz*. Obtenido de El Universal web site: <https://www.eluniversal.com.mx/menu/de-que-esta-hecha-la-fecula-de-maiz-y-como-se-usa>
- Nair, L. S., & Laurencin, C. T. (2007). Biodegradables polymers as biomaterials. *Progress in polymer science*, 762-798.

- Neri Rojas, I. (2022). Desarrollo de películas comestibles, a base de mucílago de nopal, con alta resistencia térmica. Oaxaca de Juárez, Oaxaca: Tesis de Licenciatura.
- Oliva, G. (2012). *Plásticos Biodegradables*. Escuela Universitaria de Ingeniería Industrial: Universidad de Zaragoza.
- Oñoro, J. (2005). Adhesivos. El reto de unir todo con todo. *Ingeniería y Ciencia de los materiales industriales*, 6-14. Obtenido de <http://www.upm.es/investigacion/actividades/2005>
- Orozco, E. (2017). Elaboración y caracterización de películas de mucílago de nopal-pectina: efecto de la concentración del mucílago de nopal en las propiedades fisicoquímicas y mecánicas. Obtenido de <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/67766>
- Ozdemir, M., & Floros, J. (2008). Optimization of edible whey protein films containing preservatives for water vapor permeability, water solubility and sensory characteristics. 215-224.
- Rafieian, F., Shahedi, M., Keramat, J., & Simonsen, J. (2014). Thermomechanical and morphological properties of nanocomposite films from wheat gluten matrix and cellulose nanofibrils. *Journal of Food Science*, 100-107.
- Ramos, O., Fernandes, J., Silva, S., Pintado, M., & Malcata, X. (2012). Edible films and Coatings from Whey Proteins: A Review on Formulation, and on Mechanical and Bioactive Properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 533-552. doi:10.1080/10408398.2010.500528

- Ramos-García, M., Bautista-Baños, S., Barrera-Necha, L., Bósquez-Molina, E., Alia-Tejacal, I., & Estrada-Carrillo, M. (2010). Compuestos antimicrobianos adicionados en recubrimientos comestibles para uso en productos hortofructícolas. *Revista mexicana de fitopatología*, 44-57. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmfi/v28n1/v28n1a5.pdf>
- Rimsa, S., & Tatarka, P. (2009). Starch ester blends with linear polyesters. *US7517924*.
- Robayo Gallego, J. (2018). Elaboración de un biopolímero a base de almidón de yuca como indicador de cambio de pH para un queso tipo Paipa. Bogotá: Proyecto de grado.
- Roblejo, L. (2010). *Evaluación de la aplicación de coberturas de quitosano en la conservación de tomates*. [Tesis de licenciatura, Universidad de la Habana].
- Sahana, T. G., & Rekha, P. D. (2018). Biopolymers: Applications in wound healing and skin tissue engineering. *Molecular Biology Reports*, 2857-2867. doi:<https://doi.org/10.1007/s11033-018-4296-3>
- Salgado Garciglia, R. (2023). ¿Biopelículas comestibles? *sabermás*. Obtenido de <https://www.sabermas.umich.mx/archivo/articulos/47-numero-6/93-ibiopelículas-comestibles.html>
- Sánchez-González, L., Pastor, C., Vargas, M., Chiralt, A., & González-Martínez, C. (2011). Effect of hydroxypropylmethylcellulose and chitosan coatings with and without bergamot essential oil on quality and safety of cold-stored grapes.

Shimazu , A. A., Mali, S., & Grossmann, M. V. (2007). Efeitos plastificante e antiplastificante do glicerol e do sorbitol em filmes biodegradáveis de amido de mandioca. *Ciências Agrárias*, 79-88.

Sothornvit, R., & Krochta, J. M. (2000). Plasticizer effect on oxygen permeability of Bactoglobulin films. *J. Agric. Food Chem*, 6298-6302.

Suriñach, S., Baro, M., Bordas, S., Clavaguera, N., & Clavaguera-Mora, M. (1992). La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la ciencia de Materiales. *Sociedad española de cerámicas y vidrios*, 11-17.

tesa. (2023). *¿Cuánta miel necesitas para colgar una foto?* Recuperado el Enero de 2023, de tesa web site: <https://www.tesa.com/es-es/wikitapia/cuanta-miel-necesitas-para-colgar-una-foto.html>

Tomka, I. (1998). Biologically degradable polymer mixture. *US5844023*.

Tomka, I. (2000). Thermoplastic processable starch or starch derivative polymer mixtures. *US6117925*.

Trejo, V., Aragón, N., & Miranda, P. (2001). Estimación de la permeabilidad al vapor de agua en películas a base de quitosán. *Revista de la Sociedad Química de México*, 01-05. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rsqm/v45n1/v45n1a1.pdf>

- Tuncer, C., Serkan, D., Mehmet, S. E., & Olgun, G. (2005). Poly(ethylene oxide) and its blends with sodium alginate. *Polymer*, 10750-10757.
- Universidad Tecnológica Nacional. (2014). *Polímeros*. Buenos Aires.
- Vasconez, M., Flores, S., Campos, C., Alvarado, J., & Gerschenson, L. (2009). Antimicrobial activity and physical properties of chitosan-tapioca starch based edible films and coatings. *Food Research International*, 762-769. doi:10.1016/j.foodres.2009.02.026.42
- Vásquez-Luna, A., Santiago, M., Rivadeneyra-Domínguez, E., & Díaz-Sobac, R. (2019). Películas comestibles a base de almidón nanoestructurado como material de barrera a la humedad. *CienciaUAT*, 152-164.
- Vega, T. J., & Chávez, C. A. (2009). *Elaboración de biopelículas a partir de almidón de maíz (Zea Mays)*. Tesis IQI-ESIQIE-IPN.
- Velde, K. V., & Kiekens, P. (2002). Biopolymers: overview of several properties and consequences on their applications. *Polymer Testing*, 433-442.
- Vroman, I., & Tighzert, L. (2009). Biodegradable polymers. *Materials*, 307-344. doi:https://doi.org/10.21897/RTA.V12I2.652
- Waniska, R. D., & Gómez, M. H. (1992). Dispersion behavior of starch. *Food Tech*, 110-118, 123.
- Wurzburg, O. B. (1986). Modified Starches: Properties and Uses. *CRC Press*, 4-10, 29-40, 254-256.

ANEXOS

ANEXO A. MEDICIÓN DEL ESPESOR

Cuadro A1. Puntos de medición de la película M1

	A	B	C
Punto	Espesor (mm)	Espesor (mm)	Espesor (mm)
1	0.06	0.06	0.14
2	0.06	0.15	0.13
3	0.08	0.12	0.07
4	0.09	0.09	0.06
5	0.17	0.05	0.05
6	0.07	0.05	0.07
7	0.08	0.10	0.10
8	0.10	0.15	0.07
Promedio	0.0887	0.0962	0.0862

Espesor promedio: 0.0904 mm

Cuadro A2. Puntos de medición de la película M2

	A	B	C
Punto	Espesor (mm)	Espesor (mm)	Espesor (mm)
1	0.08	0.10	0.07
2	0.08	0.08	0.07
3	0.07	0.10	0.07
4	0.06	0.08	0.08
5	0.07	0.10	0.05
6	0.09	0.09	0.07
7	0.08	0.07	0.07
8	0.08	0.08	0.09
Promedio	0.0762	0.0875	0.0725

Espesor promedio: 0.0787 mm

Cuadro A3. Puntos de medición de la película M3

	A	B	C
Punto	Espesor (mm)	Espesor (mm)	Espesor (mm)
1	0.03	0.05	0.04
2	0.03	0.04	0.05
3	0.05	0.03	0.05
4	0.07	0.03	0.05
5	0.06	0.03	0.05
6	0.11	0.04	0.05
7	0.04	0.07	0.05
8	0.03	0.07	0.05
Promedio	0.0525	0.045	0.0487

Espesor promedio: 0.0487 mm

Cuadro A4. Puntos de medición de la película M4

	A	B	C
Punto	Espesor (mm)	Espesor (mm)	Espesor (mm)
1	0.04	0.12	0.03
2	0.09	0.06	0.06
3	0.09	0.04	0.07
4	0.07	0.04	0.07
5	0.05	0.03	0.06
6	0.04	0.06	0.03
7	0.06	0.08	0.03
8	0.06	0.06	0.06
Promedio	0.0625	0.0612	0.0512

Espesor promedio: 0.0583 mm

ANEXO B. CALCULO DE LA SOLUBILIDAD

Cuadro B1. Lecturas de las pruebas de solubilidad para película M1

Temperatura	Cuadro	mi (mg)	mf (mg)	% Solubilidad	% Solubilidad
25 °C	A	25.9	24.1	6.949	7.115
	B	24.9	23.2	6.827	
	C	26.7	24.8	7.116	
	D	34.4	31.9	7.267	
	E	31	28.7	7.419	
94 °C	A	25.6	21.9	14.453	19.678
	B	33.9	30.1	11.209	
	C	32.7	18.2	44.342	
	D	37.2	32.8	11.827	
	E	32	26.7	16.562	

Cuadro B2. Lecturas de las pruebas de solubilidad para película M2

Temperatura	Cuadro	mi (mg)	mf (mg)	% Solubilidad	% Solubilidad
25 °C	A	27.1	25.6	5.535	5.589
	B	33.3	31.2	6.306	
	C	24.1	22.8	5.394	
	D	29.2	27.7	5.136	
	E	26.9	25.4	5.576	
94 °C	A	36.7	32.7	10.899	10.696
	B	31.2	27.4	12.179	
	C	26.4	23.8	9.848	
	D	36	32.2	10.555	
	E	31	27.9	10	

Cuadro B3. Lecturas de las pruebas de solubilidad para película M3

Temperatura	Cuadro	mi (mg)	mf (mg)	% Solubilidad	% Solubilidad
25 °C	A	13.6	12.8	5.882	5.459
	B	16.6	15.8	4.819	
	C	16.3	15.3	6.134	
	D	22.2	20.9	5.855	
	E	21.7	20.7	4.608	
94 °C	A	29.2	26.1	10.616	9.907
	B	12.3	11.2	8.943	
	C	17.3	15.7	9.248	
	D	26.1	23.8	9.961	
	E	32.5	29	10.769	

Cuadro B4. Lecturas de las pruebas de solubilidad para película M4

Temperatura	Cuadro	mi (mg)	mf (mg)	% Solubilidad	% Solubilidad
25 °C	A	26.5	24.7	6.792	5.389
	B	28.1	25.8	8.185	
	C	10.3	10	2.913	
	D	20	19	5	
	E	14.8	14.2	4.054	
94 °C	A	22.4	21	6.25	8.647
	B	31.7	29.4	7.256	
	C	28.8	26.5	7.986	
	D	25.3	21.8	13.834	
	E	21.5	19.8	7.907	

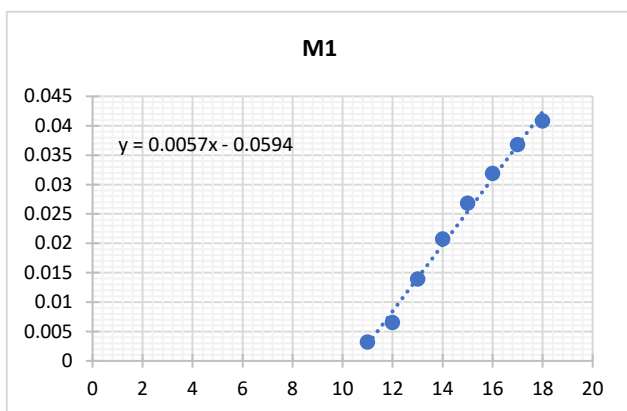
ANEXO C. CÁLCULOS DE LA PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA

Cuadro C1. Pesos registrados durante la prueba (gramos)

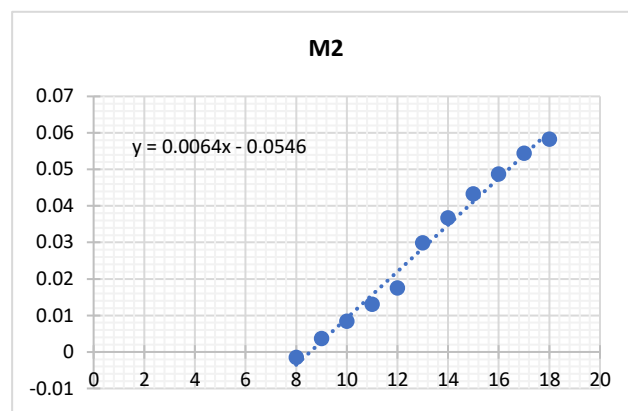
Tiempo (h)	M1	M2	M3	M4
0	29.3495	31.4178	29.5594	29.7738
1	29.3338	31.407	29.553	29.7662
2	29.3313	31.4055	29.5513	29.7651
3	29.3307	31.4046	29.5509	29.7647
4	29.3301	31.4039	29.5498	29.7636
5	29.3308	31.4031	29.5498	29.7634
6	29.3314	31.4021	29.5494	29.7626
7	29.3364	31.4112	29.5495	29.7628
8	29.3412	31.4163	29.5512	29.7644
9	29.345	31.4215	29.5517	29.7652
10	29.3491	31.4262	29.552	29.757
11	29.3527	31.4308	29.5517	29.7655
12	29.356	31.4353	29.5516	29.7653
13	29.3634	31.4477	29.5523	29.765
14	29.3702	31.4545	29.5533	29.7655
15	29.3763	31.4611	29.554	29.7661
16	29.3814	31.4665	29.5543	29.7662
17	29.3863	31.4722	29.5544	29.7665
18	29.3903	31.4761	29.5543	29.7664

Cuadro C2. *Perdidas y aumentos registrados durante la prueba (gramos)*

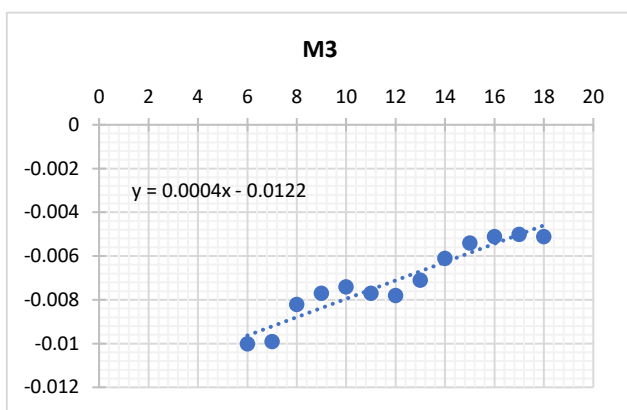
Tiempo (h)	M1	M2	M3	M4
0	0	0	0	0
1	-0.0157	-0.0108	-0.0064	-0.0076
2	-0.0182	-0.0123	-0.0081	-0.0087
3	-0.0188	-0.0132	-0.0085	-0.0091
4	-0.0194	-0.0139	-0.0096	-0.0102
5	-0.0187	-0.0147	-0.0096	-0.0104
6	-0.0181	-0.0157	-0.01	-0.0112
7	-0.0131	-0.0066	-0.0099	-0.011
8	-0.0083	-0.0015	-0.0082	-0.0094
9	-0.0045	0.0037	-0.0077	-0.0086
10	-0.0004	0.0084	-0.0074	-0.0168
11	0.0032	0.013	-0.0077	-0.0083
12	0.0065	0.0175	-0.0078	-0.0085
13	0.0139	0.0299	-0.0071	-0.0088
14	0.0207	0.0367	-0.0061	-0.0083
15	0.0268	0.0433	-0.0054	-0.0077
16	0.0319	0.0487	-0.0051	-0.0076
17	0.0368	0.0544	-0.005	-0.0073
18	0.0408	0.0583	-0.0051	-0.0074



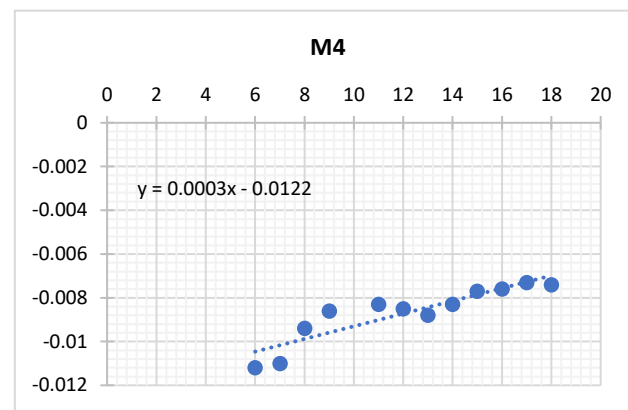
a)



b)



c)



d)

Grafica C1. Diferencias de masa a través del tiempo (dm/dt): a) Película M1, b) Película M2, c) Película M3, d) Película M4

ANEXO D. CÁLCULOS DEL MODULO DE YOUNG

Cuadro D1. Lecturas del texturómetro INSTRON serie 4442

Película M1		Película M2		Película M3		Película M4	
Extensión [mm]	Carga [kN/cm ²]	Extensión [mm]	Carga [kN/cm ²]	Extensión [mm]	Carga [kN/cm ²]	Extensión [mm]	Carga [kN/cm ²]
0	0	0	0	0	0	0	0
61.63	0.25	2	0.65	0.25	1.95	0.25	2.64
75.13	0.35	4	0.82	0.5	2.91	0.5	1.61
82.39	0.4	6	0.92	0.75	4.58	0.75	3.92
87.66	0.42	8	1	1	5.85	1	5.69
93.3	0.4564	10	1.1	1.25	6.84	1.25	6.87
93.47	0.45	12	1.15	1.43	7.06	1.5	7.73
96.57	0	13.52	1.181	1.44	0	1.75	8.12
		14	1.17			2	7.72
		16	1.07			2.25	7.67
		18	0.97			2.5	7.7
		20	0.67			2.75	7.65
		22	0.13			3	7.57
		22.08	0			3.25	7.52
						3.5	7.47
						3.75	7.37
						3.85	0

Cuadro D2. Módulo de Young de la película M1

Carga [MPa]	Extensión [m]	Deformación	Módulo de Young [MPa]
0	0.1	0	0
2.5	0.16163	0.6163	4.0564
3.5	0.17513	0.7513	4.6585
4	0.18239	0.8239	4.8549
4.2	0.18766	0.8766	4.7912
4.564	0.1933	0.933	4.8917
4.5	0.19347	0.9347	4.8143
0	0.19657	0.9657	0
			4.677896797

Cuadro D3. Módulo de Young de la película M2

Carga [MPa]	Extensión [m]	Deformación	Módulo de Young [MPa]
0	0.1	0	0
6.5	0.102	0.02	325
8.2	0.104	0.04	205
9.2	0.106	0.06	153.3333
10	0.108	0.08	125
11	0.11	0.1	110
11.5	0.112	0.12	95.8333
11.81	0.11352	0.1352	87.352
11.7	0.114	0.14	83.5714
10.7	0.116	0.16	66.875
9.7	0.118	0.18	53.8888
6.7	0.12	0.2	33.5
1.3	0.122	0.22	5.909
0	0.12208	0.2208	0
			112.105

Cuadro D4. Módulo de Young de la película M3

Carga [MPa]	Extensión [m]	Deformación	Módulo de Young [MPa]
0	0.1	0	0
19.5	0.10025	0.0025	7800
29.1	0.1005	0.005	5820
45.8	0.10075	0.0075	6106.6666
58.5	0.101	0.01	5850
68.4	0.10125	0.0125	5472
70.6	0.10143	0.0143	4937.0629
0	0.10144	0.0144	0
			5997.6216

Cuadro D5. Módulo de Young de la película M4

Carga [MPa]	Extensión [m]	Deformación	Módulo de Young [MPa]
0	0.1	0	0
26.4	0.10025	0.0025	10560
16.1	0.1005	0.005	3220
39.2	0.10075	0.0075	5226.6666
56.9	0.101	0.01	5690
68.7	0.10125	0.0125	5496
77.3	0.1015	0.015	5153.3333
81.2	0.10175	0.0175	4640
77.2	0.102	0.02	3860
76.7	0.10225	0.0225	3408.8888
77	0.1025	0.025	3080
76.5	0.10275	0.0275	2781.8181
75.7	0.103	0.03	2523.3333
75.2	0.10325	0.0325	2313.8461
74.7	0.1035	0.035	2134.2857
73.7	0.10375	0.0375	1965.3333
0	0.10385	0.0385	0
			4136.9003