

UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ MARÍA ARGUEDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



**PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE UNA
BIOPELICULA FORMULADA CON ALMIDÓN DE PAPA
(*Solanum tuberosum*) Y MUCILAGO DE NOPAL
(*Opuntia ficus*)**

TESIS PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL

Presentado por : Br. Chocano Peralta, Nelida del Rocio
ASESOR : Ing. M.Sc. DAVID CHOQUE QUISPE

ANDAHUAYLAS – APURÍMAC – PERÚ
2019

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida, salud y sabiduría. **A mis padres**, que sin ellos no hubiera logrado esta meta, me dieron todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi perseverancia y mi coraje para seguir. Papá gracias por siempre estar ahí, por el ejemplo de constancia y las ganas de salir adelante. Mamá, tu afecto y tu cariño son los detonantes de mi felicidad, gracias por enseñarme con amor y confianza, por ser mi sustento, fortaleza y ejemplo, gracias por no caer, por no darte por vencida, por no cortarme las alas; no pude pedir mejor madre en esta vida.

A mi familia, por el apoyo, los consejos y las enseñanzas. Hermano, conversar contigo hace que cualquiera quiera saber más, Mamama nuestro ángel de la guarda y mujer sabia, Tía Mónica consejera incondicional.

Rocio.

AGRADECIMIENTO

- En primer lugar a Dios por permitirme estar en esta vida.
- A mis padres, por darme la vida, apoyarme incondicionalmente, por brindarme amor, por sus consejos, por dejarme crecer, por siempre estar ahí, como padres y como amigos.
- A mi abuela, por ayudarme en esta formación profesional, por nunca dejarnos solos, por llenarnos de amor y sabiduría.
- A la Universidad Nacional José María Arguedas, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial por brindarme las herramientas que me permiten desenvolverme en este mundo competitivo y por permitirme desarrollar este trabajo de investigación en sus instalaciones.
- A mi asesor Ing. M.Sc. David Choque Quispe, quien no solo me brindó su apoyo durante el desarrollo de este trabajo de investigación, si no también cada vez que recurría a él durante el desarrollo de mi formación universitaria.
- Al Ing. Betsy Suri Ramos Pacheco, por el apoyo, consejos y enseñanzas durante el desarrollo de este trabajo de investigación.
- Al Ing. Yasmine Diaz Barrera, no solo por su amistad si no por el tiempo y dedicación que me brindó durante el desarrollo de este trabajo de investigación.
- A los miembros de mí jurado calificador, Ing. Fredy Taipe Pardo, Ing. MSc. Carlos Alberto Ligarda Samanéz e Ing. MSc. Abel Barrial Lujan por sus valiosos comentarios y correcciones para culminar el presente informe.

ÍNDICE	
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	x
ABSTRAC	xi
CHUMASQA	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I	1
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	1
1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	2
CAPÍTULO II	3
2. ANTECEDENTES	3
CAPÍTULO III	6
3. MARCO TEORICO	6
3.1. PELÍCULAS BIOPOLIMÉRICAS	6
3.1.1. Propiedades funcionales de las películas comestibles	8
3.1.2. Componentes de películas comestibles	8
3.2. ALMIDÓN DE PAPA	10
3.2.1. Características del granulo de almidón	11
3.2.2. Propiedades físicas y químicas del almidón	11
3.2.3. Propiedades tecnofuncionales del almidón	13
3.3. NOPAL	15
3.3.1. Características nutritivas del nopal	16
3.3.2. Mucilago de nopal	16
3.3.3. Propiedades del mucilago de nopal	18
3.4. LA PECTINA	18
3.4.1. La gelificación de la pectina	18

3.4.2.	Factores que influyen en la gelificación de la pectina	18
3.5.	PLASTIFICANTES.....	20
3.5.1.	Glicerol	20
3.6.	TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE BIOPELÍCULAS	21
3.6.1.	Propiedades de barrera al vapor de agua.....	21
3.6.2.	Propiedades de barrera a gases.....	21
3.6.3.	Propiedades mecánicas	22
3.6.4.	Propiedades físicas	22
3.7.	MARCO CONCEPTUAL.....	24
	CAPÍTULO IV	26
4.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	26
4.1.	LUGAR DE ESTUDIO	26
4.2.	MATERIA PRIMA.....	26
4.3.	MATERIALES, INSTRUMENTOS Y EQUIPOS.....	26
4.4.	POBLACIÓN, MUESTRA, TIPO DE MUESTREO, UNIDAD DE ANÁLISIS	27
4.4.1.	Población.....	27
4.4.2.	Muestra	28
4.4.3.	Tipo de muestreo.....	28
4.5.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	28
4.6.	MÉTODOS Y TÉCNICAS	29
4.6.1.	Métodos	29
4.6.2.	Técnicas de análisis por objetivos	33
4.7.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.....	35
4.8.	DISEÑO EXPERIMENTAL Y MATRIZ DE DISEÑO	35
4.9.	TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	36
	CAPÍTULO V.....	38
5.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	38
5.1.	SOLUBILIDAD DE LAS BIOPELÍCULAS	38

5.2. COLOR Y OPACIDAD DE LAS BIOPELÍCULAS.....	41
5.3. RESISTENCIA A DISOLVENTES DE LAS BIOPELÍCULAS	48
5.4. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS BIOPELÍCULAS.....	48
CONCLUSIONES.....	52
RECOMENDACIONES	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Equipos e instrumentos	26
Tabla 2: Materiales.....	27
Tabla 3: Reactivos e insumos	27
Tabla 4: Diseño experimental para la síntesis del biopolímero	36
Tabla 5: Solubilidad (%) de las biopelículas	38
Tabla 6: p-value para efectos e interacción en la solubilidad.....	39
Tabla 7: Color L* a* b* de las biopelículas.....	41
Tabla 8: Coloración de las biopelículas	44
Tabla 9: p-value para efectos e interacción de la coloración	46
Tabla 10: Resistencia a disolventes	48
Tabla 11: Deformación y esfuerzo máximo de las biopelículas	50
Tabla 12: p-value para efectos de la deformación y esfuerzo máximo	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura química de la amilosa.	12
Figura 2. Estructura química de la amilopectina.	12
Figura 3: Gelatinización del almidón	14
Figura 4: Modificación del almidón sometido a hidrocaldentamiento.....	15
Figura 5: Distribución estructural del mucílago de nopal	17
Figura 6: Estructura del glicerol	20
Figura 7: Diagrama de bloques del proceso de extracción de almidón de papa nativa. ...	29
Figura 8: Diagrama de bloques del proceso de extracción de mucilago de nopal.	31
Figura 9: Diagrama de bloques del proceso de elaboración de la biopelícula natural.....	32
Figura 10: Diagrama de medias de la solubilidad.....	38
Figura 11: Diagrama de efectos principales para la solubilidad.....	39
Figura 12: Diagrama de interacción AP-T para la solubilidad.....	40
Figura 13: Diagrama de interacción P-T para la solubilidad	40
Figura 14: Diagrama de medias de la Luminosidad L*	42
Figura 15: Diagrama de medias del croma a*	42
Figura 16: Diagrama de medias del croma b*	43
Figura 17: Diagrama de medias para la opacidad.....	44
Figura 18: Diagrama de medias para el índice de amarillo.....	45
Figura 19: Diagrama de medias para el índice de blancura	45
Figura 20: Diagrama efectos para opacidad, índice de amarillos e índice de blancura ...	46
Figura 21: Diagrama de interacción para opacidad, índice de amarillos e índice de blancura.....	47
Figura 22: Variación del esfuerzo de las biopelículas.....	49
Figura 23: Efectos para la deformación unitaria	50
Figura 24: Efectos para el esfuerzo máximo	51

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

AP	: Almidón de papa
P	: Pectina
M	: Mucilago
G	: Glicerina
σ_{max}	: Esfuerzo máximo
F_{max}	: Fuerza máxima
ϵ	: Deformación unitaria
A_t	: Área transversal
Yp	: Padrón negro
Yb	: Padrón blanco
YI	: Índice de Amarillos
WI	: Índice de Blancura
CI	: Índice de Color
PEAD	: Polietileno de alta densidad
T°	: Temperatura
C°	: Grados Celsius
rpm	: revoluciones por minuto
Q.P	: Químicamente puro

RESUMEN

El trabajo de investigación tuvo por objetivo evaluar las propiedades físicas y mecánicas de una biopelícula formulada con almidón de papa (*Solanum tuberosum*) y mucilago de nopal (*Opuntia ficus*). Para la elaboración de las biopelículas, se utilizó almidón de papa nativa de la variedad Yana palta al 2% (AP), mucilago de nopal cristalizado al 0.5% (M), pectina cítrica de alto metoxilo al 2% (P), y glicerina Q.P. (G), se formularon seis tratamientos T1 (50% AP, 42% P, 4% G, 4% M, 50°C), T2 (60% AP, 32% P, 4% G, 4% M, 50°C), T3 (70% AP, 22% P, 4% G, 4% M, 50°C), T4 (50% AP, 42% P, 4% G, 4% M, 60°C), T5 (60% AP, 32% P, 4% G, 4% M, 60°C), T6 (70% AP, 22% P, 4% G, 4% M, 60°C), las cuales fueron sometidas a un secador convectivo de aire forzado durante 24 horas, y se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas. Se observó que la solubilidad al agua es mayor con el incremento %P, en cuanto al color la opacidad y el índice de amarillo estos se incrementaron con la temperatura, mientras que el índice de blancura disminuyó con la misma, así mismo se observó que las biopelículas son más resistentes en medios apolares, mientras que en solventes polares disminuyó la resistencia para las biopelículas elaboradas a menor temperatura. Las propiedades mecánicas fueron evaluadas a través de un texturómetro diseñado y calibrado por el Laboratorio de Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, observándose que las biopelículas presentan mejor resistencia a la ruptura a mayor temperatura de elaboración y que incrementos de almidón de papa y pectina reportan menores valores, por otra parte, la deformación unitaria fue mayor cuando se adicionó almidón de papa y se incrementó la temperatura. En conclusión las biopelículas presentaron buenas propiedades físicas y mecánicas.

Palabras clave: biopelícula, índice de color, propiedades mecánicas, propiedades físicas.

ABSTRAC

The objective was to evaluate physical and mechanical properties of a biofilm made with potato starch (*Solanum tuberosum*) and nopal mucilage (*Opuntia ficus*). Native potato starch extracted from Yana Palta variety at 2% (AP), crystalized nopal mucilage at 0.5% (M), high metoxile citric pectin at 2% (P), and glycerine Q.P. (G) were used to make biofilms. Six treatments were formulated; T1 (50% AP, 42% P, 4% G, 4% M, 50°C), T2 (60% AP, 32% P, 4% G, 4% M, 50°C), T3 (70% AP, 22% P, 4% G, 4% M, 50°C), T4 (50% AP, 42% P, 4% G, 4% M, 60°C), T5 (60% AP, 32% P, 4% G, 4% M, 60°C) and T6 (70% AP, 22% P, 4% G, 4% M, 60°C). Biofilms were dried with forced-air convection in a lab oven during 24 hours. Then, the physical and mechanical properties were evaluated. It was observed that solubility in water is higher when %P increases. The color shows that the opacity and the yellow index increases with temperature while the whiteness index decreases with temperature. Furthermore, it was observed that the biofilms are more resistant in apolar environments while in polar solvents the biofilm resistance made in low temperatures decreases. The mechanical properties were evaluated through a texturometer of Universidad Nacional Mayor de San Marcos, which was design and calibrated in its chemical lab. The biofilms present a better resistance to the rupture in higher preparation temperatures as long as biofilms with potato starch and pectin with more concentration show lower values. On the other hand, the unitary deformation is higher when temperature increases and potato starch are added. In conclusion, biofilms present good physical and mechanical properties.

Keywords: biofilm, color index, mechanical properties, physical properties.

CHUMASQA

Kay taqwiri y llamkaymi aypayman churakurqa qatipaypa chawpinta chay mana rikuna churakuq hinaspa llapchana kurukuna biopelícularisqa papapa yuraq akunpi (Solanum tuberosum- nisqa) chaynataq tunaspa lawsanpi (Opuntia ficus- nisqa). Chaykunawan chay biopelícularisqa rurakunanpaq churakurqa kitapapa yuraq akunta chay yana palta layamanta chitqasqa yupaypi 2% (AP), tunaspa lawsanta chitqasqa yupaypi chuyanchasqa 0.5% (M), pectina cítrica chay wicharisqa metoxilo nisqata chitqasqa yupaypi 2% (P), chaynataq glicerinanisqa Q.P. (G), arí rurakurqam suqta qatipaykunta kay qawachiykuna nisqanmanhina T1 (50% AP, 42% P, 4% G, 4% M, 50°C), T2 (60% AP, 32% P, 4% G, 4% M, 50°C), T3 (70% AP, 22% P, 4% G, 4% M, 50°C), T4 (50% AP, 42% P, 4% G, 4% M, 60°C), T5 (60% AP, 32% P, 4% G, 4% M, 60°C), T6 (70% AP, 22% P, 4% G, 4% M, 60°C), kaykunam rupayman qawichisqa wayrachisqa chakichiyman churasqakarqa tutapunchaw, chaymi qatipasqa karqa imaynatam tarikurqan rikuna mana rikuna chay qatipaykuna ukupi. Qawarikurqa yakuwan chapusqa kaspá chaylla chullusqanta %P nisqa, chaymanta llimpinñataq ranparanpallata rikukurqa chaynataq rupaywan qilluyaynin yaparukurqan, chaypachaqa chaymanhina ichaqa yuraqaynin pisiyarurqa, chaynataq rikukurqa chaynataq biopelícularisqa tukururqa ancha kallpachasqa mana qawana chay apolaresnisqanpi ichaqa huk umiykunawan chapusqa pisiyarin kallpachasqa kaynin pisi rupayllapi biopelícularisqa rurasqa kasqanrayku. Llapan rikukuq hinaspa rikchaynin kaqninkuna qatipasqa karqa chay texturometronisqa llamkanawan rikurichisqa hinaspa unanchasqa chay llamkana mana rikuna urukuna utaq tukuy rikchaq qawana kaq Laboratorio Químiconisqa chay kuraq tiqsi hatun yachay wasi San Marcos, qawachikurqa chay biopelícularisqa allin kallpanchakuyta nisyu rupaypi yapakurqataq papapa yuraq akun hinaspa pectinanisqataq uraykurqa, chaymanta papapa yuraq akun yaparukuptin wicharirurqa rupariynin. Chuymayninpi chay biopelícularisqa allin allin kasqanta .

Pisi rimayllapi simikuna: mana rikuna kawsaqkuna, llimpisqakuna, tukuy kaqniyuqkuna, kikiñanmanta kaqkuna.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de polímeros sintéticos es considerado uno de los grandes avances del siglo XX, debido a la multiplicación de sus posibilidades de uso, no solo en la industria sino en la vida cotidiana. Estos polímeros sintéticos se obtienen fundamentalmente a partir del petróleo y son creados para funciones específicas. Sin embargo, estas mismas ventajas pueden ser sus peores inconvenientes. La alta resistencia a la corrosión, al agua y a la descomposición bacteriana los convierte en residuos difíciles de eliminar y, consecuentemente, en un grave problema ambiental. El polietileno y el polipropileno (bolsas plásticas) pueden tardar hasta 500 años en descomponerse. Según algunos reportes, el mundo consume un millón de bolsas plásticas por minuto, es decir, más de 500 billones al año.

La necesidad de reducir el uso de materiales sintéticos no renovables ha impulsado la investigación sobre empaques con un menor impacto ambiental. Aun así, los empaques deben proporcionar las propiedades físicas, mecánicas, de barrera al vapor de agua y barrera a gases, necesarias para la conservación de alimentos. Para lograr este objetivo, se ha reportado que los materiales prometedores para la fabricación de empaques de fuentes renovables son los biopolímeros. Los biopolímeros se generan por sistemas biológicos, o pueden ser sintetizados químicamente a partir de materiales de origen renovable; por lo que una característica fundamental de los biopolímeros es que su degradación se presenta en lapsos de tiempo cortos, desde semanas a pocos meses.

El objetivo del trabajo de investigación fue el de evaluar las propiedades físicas (Opacidad, solubilidad y resistencia a disolventes) y mecánicas (elongación y resistencia a la tensión) de una biopelícula formulada con almidón de papa (*Solanum tuberosum*) y mucilago de nopal (*Opuntia ficus*), para recubrimientos utilizando recursos renovables de la zona, basada en investigaciones públicas de biopolímeros.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Dentro de la agroindustria se propone diferentes productos con transformaciones mínimas que satisfagan al consumidor, y que además estos productos posean características naturales de un alimento; esto se logra en muchos casos a través de la protección o empaque con polímeros sintéticos.

Actualmente se conoce de la tendencia del uso de materiales biodegradables, y se han hecho esfuerzos por encontrar soluciones amigables al medio ambiente, con el fin de disminuir el consumo directo e indirecto de plásticos, y que estos productos al biodegradarse sean una fuente secundaria de uso.

En la literatura actualizada se puede encontrar trabajos e investigaciones en las que se proponen y emplean materiales de recubrimiento formulado con: almidones, quitosano, pectinas, ceras, gomas, pectinas y proteínas con el fin de prolongar la vida de productos hortofrutícolas.

Así el mucilago del nopal (*Opuntia ficus*) siendo un biopolímero natural de alta producción silvestre en nuestra zona, sería una importante fuente como recurso derivado para la producción de películas comestibles, puesto que se han realizado muchos trabajos basados en la eficacia polimérica de esta cactácea.

Por otra parte, en nuestra región, la población económicamente activa, la conforman los agricultores, y gran parte de ellos se dedican al rubro del cultivo de papa, y que muchas veces sus costos en el mercado son irrisorios, y por ello es necesario buscar otros usos a este tubérculo ya sea transformado o en forma natural, es así que una alternativa de uso, serían derivados de ella, como el almidón de papa.

Conocer el comportamiento físico y mecánico de una película biopolimérica, permite su aplicación como recubrimiento en diferentes productos hortofrutícolas, ya que cada alimento presenta características diferentes durante su almacenamiento.

Es por ello que se estudió la propiedades físicas y mecánicas de una película formulada con almidón de papa (*Solanum tuberosum*) y mucilago de nopal (*Opuntia ficus*).

1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Las películas poliméricas comestibles son materiales que normalmente se solidifican en condiciones ambientales y que están conformadas por polímeros de origen natural, que para su formulación se utilizan comúnmente agentes como la glicerina, sorbitol o polietilenglicol (Ávila, 2018).

Así estas películas pueden actuar positivamente sobre la calidad y el tiempo de vida del alimento mediante la formación de barreras al oxígeno, aromas o humedad, incorporando aditivos como antioxidantes, agentes antimicrobianos o mejorando la apariencia, estructura o facilidad para la manipulación vinculada a la logística de distribución comercial, es así que estas películas presentan buenas propiedades mecánicas y de barrera.

A temperatura ambiente, una vez que son aplicados sobre el alimento en forma líquida forman una capa o membrana sólida, relativamente impermeable al agua, al oxígeno y/o al bióxido de carbono y que actúa como barrera contra sustancias extrañas. Esto permite una conservación prolongada de alimentos preparados y, en el caso de frutas y hortalizas, un control en los procesos de maduración. De hecho, las películas plásticas comestibles pueden aplicarse al alimento bajo la forma de membranas protectoras de una manera similar a como lo hiciera la naturaleza con las epidermis de los frutos, o bien, bajo la forma de bolsas de “plástico” convencionales (Arizmendi, 2004).

Por otro lado, en los últimos años ha surgido un creciente interés en las películas biopoliméricas, debido principalmente a la preocupación por la eliminación de los materiales plásticos convencionales derivados del petróleo. La degradación de los plásticos requiere un largo tiempo para su descomposición, alcanzando con ello un nivel crítico de daños irreversibles al medioambiente. Por el contrario, las películas de origen orgánico a partir de recursos renovables se degradan fácilmente (López y Jiménez, 2015).

En lo que se refiere a la materia prima para la formulación de la película, estos se encuentran de manera natural y abundante en nuestra zona, tal es el caso del nopal o comúnmente conocido como penca de tuna, así mismo la provincia de Andahuaylas presenta alta producción de papa, las cuales presentan alto contenido de almidón y estas no han sido caracterizadas completamente y menos su aplicación como aditivo.

Es por ello que se propone la formulación de una película polimérica a partir del mucilago de nopal y almidón de papa.

CAPÍTULO II

2. ANTECEDENTES

Orozco (2017), elaboró y caracterizó películas de mucilago de nopal-pectina: efecto de la concentración del mucilago de nopal en las propiedades fisicoquímicas y mecánicas. El objetivo del presente estudio fue desarrollar películas comestibles a base de mucilago de nopal (*Opuntia ficus indica*), variedad milpa alta, con un componente proteico (pectina) y glicerol como plastificante. La extracción del mucilago de nopal se llevó a cabo con una solución de CaCl_2 al 20%, mientras que la concentración de sólidos totales se realizó utilizando un termo baño a 60 °C. La elaboración de películas comestibles se llevó a cabo por el método casting (vaciado en placa), la evaporación de materia acuosa se eliminó a temperatura de 35 °C. La formulación de las películas varió en base a la concentración de sólidos totales del mucilago, tanto pectina como glicerol, permanecieron constantes. La caracterización de las películas consistió en evaluar sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas para ser utilizadas como material de protección en alimentos. Las películas que presentaron menos estabilidad térmica fueron las elaboradas con pectina-agua-glicerol (P-A-G) y pectina-glicerol (P-G), en comparación con aquellas con contenido de mucilago de nopal (P-M-G). La incorporación de mucilago de nopal en bajas concentraciones mejoró las propiedades mecánicas (elasticidad, elongación, esfuerzo máximo, etc.). La película que presentó mayor permeabilidad de vapor de agua fue la elaborada con pectina-agua-glicerol (P-A-G), encontrando además que al incrementar la concentración de sólidos totales del mucilago el PVA disminuye.

Ruiz (2006), obtuvo y caracterizó un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca, este polímero se obtuvo al procesar mezclas de almidón modificado con glicerina y agua como plastificantes, utilizando un molino abierto y una extrusora de monohusillo. Se evaluaron las características mecánicas y fisicoquímicas mediante ensayos de tensión. Se observó que en la mayoría de las mezclas no se observa una distribución homogénea de los gránulos de almidón, con un tamaño entre 0,005 a 0,020 mm, lo cual indica una dispersión pobre de estos. También se logra un alto grado de desintegración de los gránulos de almidón el cual está relacionado con el grado de desestructuración lo que indica que en todas las mezclas este se logró en una proporción bastante alta.

Mendoza y Velilla (2011), propusieron una metodología para la caracterización termo-mecánica de películas plásticas biodegradables. Se describe a metodología experimental para determinar los componentes de una película plástica biodegradable a través de análisis infrarrojo (FTIR), y la caracterización de sus propiedades termo-mecánicas

determinados a partir de ensayos de calorimétrica diferencial de barrido (DSC) y ensayos de tensión.

Meneses *et al.* (2007), realizaron la síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca, elaboraron un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca con base en la implementación de la metodología Taguchi como herramienta de diseño de experimentos. El almidón dulce de yuca se mezcló, variando las condiciones, según lo indicado por el diseño de experimentos, con reactivos que cumplen la función de plastificantes, extensores, espesantes, lubricantes, humectantes y desmoldantes. Las diferentes mezclas se sometieron a procesos comunes para los polímeros convencionales en un molino abierto, una inyectora y una prensa de vulcanización. El proceso experimental arrojó como resultado seis muestras poliméricas con características adecuadas, que se sometieron a la medición de sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y de biodegradabilidad.

Morin (2010), elaboró y caracterizó películas comestibles a base de almidón de maíz ceroso y mucílago de nopal (*Opuntia ficus*) usando la tecnología de extrusión termoplástica. Las películas comestibles se obtuvieron usando la tecnología de extrusión termoplástica usando diferentes concentraciones de almidón de maíz ceroso (60-80%), mucílago de nopal (10-30%) y plastificante (10-30%). Las mezclas fueron procesadas en un extrusor de tornillo simple y las películas obtenidas se caracterizaron en sus principales propiedades mecánicas (resistencia máxima a la tracción y alargamiento a la ruptura). En las formulaciones conteniendo 70 y 73% de almidón de maíz ceroso se obtuvieron los mejores respuestas de elongación y esfuerzo máximo a la ruptura con sus distintas combinaciones de plastificante y mucílago de nopal, destacando los tratamientos con una concentración de almidón de maíz ceroso del 70%, 20% de glicerol y 10% de mucílago de nopal, el tratamiento con una concentración del 63% de almidón de maíz ceroso, 13% de glicerol y 13% de mucílago de nopal y el tratamiento con una concentración de almidón de maíz ceroso del 70%, 10% de glicerol y 20% de mucílago de nopal, estos como los mejores, a los cuales se les caracterizó sus propiedades fisicoquímicas (solubilidad y opacidad). Como resultado de esta caracterización el tratamiento con 63% de almidón de maíz ceroso, 13% de glicerol y 13% de mucílago de nopal, mostró en general buenos resultados, este tratamiento podría ser utilizado como un método de conservación para alimentos con buenos resultados y reduciendo con la tecnología de extrusión termoplástica costos y efluentes.

López y Jiménez (2015), describen en su trabajo que el envasado es la principal fuente de desechos plásticos contaminantes. Del volumen total de desechos plásticos en el mundo,

la mayor parte corresponde al envasado de alimentos. Las películas biodegradables han sido utilizadas en numerosas aplicaciones con diferentes aspectos debido a la versatilidad de sus propiedades y por factores medioambientales. Entre los polímeros utilizados, el almidón reviste el mayor interés por su abundancia en la naturaleza, biodegradabilidad, ser renovable y de bajo costo. Por sus limitaciones, permanentemente se llevan a cabo investigaciones que evalúan la mezcla del almidón con diversos componentes en el desarrollo de nuevas películas biodegradables. La literatura al respecto es considerable y en este trabajo parte de ella fue revisada y compilada, para dar una idea del estatus de las películas a base de almidón, con énfasis en las propiedades mecánicas.

Sanchez (2017), realizó la comparación de la calidad de bioplásticos obtenidos del almidón de los residuos de papa y camote de restaurantes del mercado central del distrito de independencia. El proceso se inició con la obtención del almidón de los residuos tanto de la papa como del camote en la cual se mezcló con la glicerina, ácido acético y agua destilada. Esta mezcla se llevó al fuego aproximadamente 5 minutos, después los bioplásticos se extendieron encima de placas de vidrios de 25*25, se dejó secar a temperatura ambiente aproximadamente 3 días, para después retirarlo de la placa de vidrio. Una vez terminado el proceso de bioplásticos a partir de los residuos del almidón del camote y de la papa se trasladó en bolsas de empaque al laboratorio LABICER de la Universidad Nacional de Ingeniería para su respectivo ensayo mecánico. En el cual se determinó que la fuerza de elongación de los bioplásticos obtenidos del almidón de los residuos de camote es de $18,67 \pm 6,17$ (%), siendo este el mayor valor que la fuerza de elongación de los bioplásticos obtenidos del almidón de los residuos de papa cuyo valor es de $10,85 \pm 2,50$ (%). Además, se determinó que la fuerza de tracción de los bioplásticos obtenidos de los residuos de camote es de $1,88 \pm 0,92$ newton, siendo este el mayor valor que los bioplásticos obtenidos de los residuos de papa cuyo valor es de $0,93 \pm 0,14$ newton. Por último, se determinó que la fuerza de tracción es de $0,148 \pm 0,92$ (Mpa), y la fuerza de elongación es de $18,67 \pm 6,17$ de los bioplásticos obtenidos de los residuos de camote, siendo estos valores no mayores que el polietileno de baja densidad cuyo valor de fuerza de tracción es de $6,98 \pm 0,095$ (Mpa) y la fuerza de elongación es de $51,25 \pm 0,95$ %.

CAPÍTULO III

3. MARCO TEORICO

3.1. PELÍCULAS BIOPOLIMÉRICAS

Una película puede ser definida como una capa continua, simple y delgada de un material orgánico que a menudo se coloca en las superficies de los alimentos con la finalidad de preservar sus características fisicoquímicas (Hernández, 2016), esta capa delgada de material comestible formada es colocada entre componentes del alimento o sobre el alimento mismo; se usan principalmente para extender la vida de anaquel y la calidad de los alimentos ya que proporcionan una barrera al oxígeno, ayudando a prevenir los cambios de aroma, sabor, apariencia y las características de textura, además, de mejorar la eficiencia económica de los materiales de empaque (Zamudio-Flores *et al.*, 2007).

Los compuestos plastificantes son materiales básicos que se agregan a estas membranas con el fin de formarlas. Estos materiales tienen la particularidad de reducir las fuerzas intermoleculares, incrementar la movilidad de las cadenas de biopolímeros y mejorar las propiedades mecánicas de las películas (Mc Hugh y Krockta, 1994). La adición de compuestos plastificantes es necesaria también con el fin de aumentar la elasticidad de las mismas.

Las películas a menudo contienen componentes hidrofílicos como proteínas o polisacáridos. Estas películas proveen, bajo ciertas condiciones de humedad relativa (HR), buenas propiedades de barrera de transmisión a los gases aunque pobres propiedades de barrera al vapor de agua (Kester y Fennema, 1986). Se han reportado varios tipos de películas y cubiertas compuestas que contienen una base de polisacárido (Mali *et al.*, 2005)

Las cubiertas comestibles participan en la generación de un microclima que favorece la prolongación de la vida útil del alimento, debido a la modificación de la atmósfera por el control del intercambio gaseoso a través de la membrana, que retrasa la respiración y las reacciones oxidativas. Además, las cubiertas comestibles brindan al sistema alimenticio la posibilidad de incorporar ingredientes activos como colorantes, antioxidantes, conservantes, agentes de control del oscurecimiento químico o enzimático, condimentos y muchas otras opciones tecnológicas (Rojas *et al.*, 2009).

Existen diferentes biopolímeros con los cuales ofrecen características adecuadas para la elaboración de películas biodegradables. Si bien una película no puede sustituir completamente los materiales de empacamiento tradicionales, ofrecen muchos beneficios,

tanto en su uso individual como en mezclas con plásticos o materiales comúnmente usados en envases y embalajes de la industria alimentaria.

Rojas *et al.* (2009) considera que las películas pueden:

- Soportar aditivos alimentarios: pueden ser usados para incorporar agentes antimicrobianos, antioxidantes y otros, en localizaciones específicas del alimento.
- Retardar la migración de humedad: la velocidad de transferencia de humedad entre un alimento y la atmosfera que lo rodea puede ser reducida si el producto entero es recubierto por una película.
- Retardar la migración de aceites y grasas: películas basadas en polímeros hidrofóbicos, son altamente impermeables a grasas y aceites, atributo deseables cuando el alimento está destinado a ser freído en aceite. Algunas películas tienen la capacidad de retardar la absorción de aceite hacia el interior del alimento y, por lo tanto, mejoraría su calidad nutricional.
- Retener compuestos volátiles del flavor: películas basadas en hidrocoloides pueden desarrollar este efecto.
- Retardar el transporte de gases (O₂, CO₂): Como modo primario de deterioro de muchos alimentos involucra la oxidación de lípidos, vitaminas, componentes del flavor o pigmentos. Las películas también disminuyen la velocidad de la respiración aeróbica de frutas frescas y vegetales.
- Retardar el transporte de solutos: las coberturas comestibles pueden mantener una alta concentración de distintos compuestos sobre la superficie de un alimento colaborado a su concentración en la interface de interés. Esto puede utilizarse para minimizar la difusión de solutos hacia el interior del alimento, en la deshidratación osmótica.
- Mejorar las propiedades mecánicas frente al manipuleo e impartir integridad estructural adicional a los alimentos: el refuerzo de la estructura por una película comestible podría mejorar la integridad durante el procesamiento, almacenamiento y/o distribución.

En general, se requiere la neutralidad de los mismos o un perfil parecido al del producto en que será aplicada, para que esta no modifique el sabor, olor y otras características organolépticas del alimento.

3.1.1. Propiedades funcionales de las películas comestibles

Las películas comestibles no siempre reemplazan los empaques sintéticos, sino que racionalizan su utilización, además prolongan el estado de frescura de frutos y vegetales y el tiempo de vida útil de los alimentos y mejoran la eficiencia económica de los materiales de empaque.

Las propiedades funcionales de las películas comestibles son iguales a las de los empaques no biodegradables o sintéticos. Entre las principales se tienen: actúan como barrera a la humedad, al oxígeno y al dióxido de carbono. La permeabilidad de las películas o cubiertas comestibles se relacionan con la resistencia a los gases, al vapor de agua y al transporte de solutos (Allen *et al.*, 1963).

3.1.2. Componentes de películas comestibles

Los componentes de las películas alimentarias pueden ser divididos en tres categorías: hidrocoloides, lípidos y componentes compuestos. Los hidrocoloides incluyen proteínas, derivados de celulosa, alginatos, pectinas, almidones y otros polisacáridos; los lípidos incluyen ceras, acilgliceroles y ácidos grasos; y los componentes compuestos contienen componentes lípidos e hidrocoloides. Del tipo de componente dependerán las propiedades de cada película (Krochta *et al.*, 1994).

A. Hidrocoloides

Estas películas son usadas para el control de la migración de vapor de agua. Poseen buenas propiedades de barrera para el oxígeno, dióxido de carbono y lípidos. La mayoría de estas películas presentan propiedades mecánicas deseables para trabajar con productos frágiles, son sensibles al calentamiento y no aportan sabor (Donhowe y Fennema, 1994).

B. Polisacáridos

Las películas de polisacáridos tienen buenas propiedades de barrera a los gases y pueden adherirse a superficies de frutas y vegetales seccionados. No son buena barrera para la humedad (Guilbert, 1986). Se han elaborado películas a partir de celulosa, pectina, almidón, alginatos, quitosano, carragenina, gomas y mezclas.

Las películas de pectina, generalmente, están elaboradas de pectinas de bajo metoxilo, cloruro de calcio, un plastificante y en algunos casos ácidos orgánicos. Las pectinas son un grupo complejo de polisacáridos estructurales que están presentes

en la mayoría de las plantas. Estas películas son de alta transmisión en comparación con la cera y aceite, bajo condiciones similares (Morin, 2010).

Las películas de pectina de bajo metoxilo son utilizadas en frutas secas con el objetivo de favorecer su apariencia más que evitar la transferencia de humedad (Baldwin *et al.*, 1995).

A partir de la celulosa también se obtienen películas, los derivados de celulosa son buenos formadores de películas debido a su estructura lineal. Los ésteres de celulosa no iónicos mantienen películas solubles al agua que son duras y flexibles. El hidroxipropil e hidropropielmetil celulosa forman películas que retardan la rancidez oxidativa y la absorción de humedad en nueces (Morin, 1998).

Las películas de almidón son estables, transparentes, flexibles, generalmente permeables al gas y sensibles a la humedad (Morin, 1998).

C. Proteínas

Las películas de proteína poseen mayor resistencia al vapor de agua que el resto de los hidrocoloides solubles en agua. Son susceptibles al cambio de pH, pueden proporcionar un valor nutricional agregado al producto, son buenas formadoras de películas y se adhieren a superficies hidrofílicas (Donhowe y Fennema, 1994).

De acuerdo con Baldwin *et al.* (1995), las fuentes más comunes son caseína, zeína, soya, albúmina de huevo, lacto albúmina, suero de leche, gluten de trigo y colágeno.

Las películas de zeína contienen aceite vegetal, glicerina, antioxidantes y ácido cítrico. Éstas previenen la rancidez en productos como nueces, ya que actúan como barreras a la humedad, restringen el transporte de oxígeno y sirven como vehículos para antioxidantes. Han sido utilizadas en tabletas farmacéuticas, en confitería y se ha reportado que retardan la madurez de tomates enteros (Baldwin *et al.*, 1995).

Las películas de albúmina y las de soya, reducen la pérdida de humedad (Donhowe y Fennema, 1994). Las películas de gluten de trigo son buenas barreras al oxígeno y dióxido de carbono, tienen alta permeabilidad al vapor de agua y sus propiedades mecánicas son comparables con las películas poliméricas ((Donhowe y Fennema, 1994).). Gontard *et al.*, (1992) mejoraron la permeabilidad de éstas películas utilizando ácidos grasos, además observaron que se reduce ligeramente su transparencia y mejora sus propiedades mecánicas.

D. Películas de lípidos

Se utilizan como barrera para el vapor de agua, o como agentes de recubrimiento para conferirle brillo a productos de confitería o frutas. Las ceras son comúnmente usadas como recubrimientos de frutas y vegetales para retardar la respiración y la pérdida de humedad. Las películas de ceras son, la mayoría de las veces, más resistentes al paso de la humedad con relación a otros componentes.

Los ácidos grasos y los alcoholes grasos son barreras efectivas al vapor de agua. Las propiedades de barrera de estas películas son altamente dependientes del arreglo cristalino que presenten los lípidos (Donhowe y Fennema, 1994).

E. Películas de componentes compuestos

Este tipo de películas pueden ser formuladas para combinar las ventajas de lípidos e hidrocoloides y disminuir sus desventajas. Pueden ser utilizadas en frutas y vegetales procesados (Donhower y Fennema, 1994).

3.2. ALMIDÓN DE PAPA

El almidón es un biopolímero formado por residuos de D-glucosa unidos mediante enlaces glucosídicos y constituye el producto final de la fijación fotosintética del CO_2 atmosférico, es el principal polisacárido de reserva sintetizado por las plantas superiores (Beynum y Roels, 1985). Es un componente importante de un gran número de productos agrícolas como los cereales (maíz, trigo, arroz, cebada) en los cuales el contenido de almidón es de 30-80 %, leguminosas (frijoles, chícharos, haba) con 25-50 %, tubérculos (papa, tapioca) con 60-90 %, y algunos frutos en estado fisiológico maduro (mango, plátano) los cuales pueden contener hasta un 70 % en base seca de este carbohidrato (Núñez *et al.*, 2004).

Se encuentra en forma de gránulos insolubles en las semillas o granos, tubérculos, raíces y tallos de las plantas, de las cuales constituye su principal forma de reserva energética que es utilizada durante los periodos de dormancia, germinación y crecimiento de las plantas (Wang *et al.*, 2007).

Debido a las propiedades fisicoquímicas y funcionales que presenta el almidón se utiliza en diferentes industrias como la de alimentos, farmacéutica, textil y petrolera. Sin embargo, las propiedades fisicoquímicas que presentan los almidones están gobernadas por el contenido de sus dos polisacáridos constituyentes: amilosa y amilopectina, así como a la organización de estos dos polímeros en el interior del gránulo. Una propiedad del almidón en relación a su funcionalidad en los alimentos es la habilidad para absorber agua durante

su calentamiento, lo cual resulta en la gelatinización y pérdida de la organización granular (Blazek y Copeland, 2007).

3.2.1. Características del granulo de almidón

Las características particulares de los gránulos de almidón son: tamaño, forma y el contenido de amilosa y amilopectina. La estructura rígida de los gránulos se conforma por capas concéntricas de amilosa y amilopectina distribuidas radialmente; es decir, es una mezcla de moléculas lineales y ramificadas. Cuando hay asociaciones paralelas entre estas, se mantienen juntas por puentes de hidrógeno de lo que resultan regiones cristalinas, lo cual causa que el granulo sea birrefringente; y evita su disolución en agua fría por la formación de una malla molecular que mantiene juntos los gránulos (Soriano Colchado, 1986).

3.2.2. Propiedades físicas y químicas del almidón

Las propiedades físicas y químicas dependen de la organización física y química (las cantidades respectivas de estos polisacáridos), los cuales otorgan determinadas propiedades fisicoquímicas y características funcionales a los diferentes almidones (Singh, Singh, Kaur, Singh, & Singh, 2003).

Además de la amilosa y amilopectina, existen otros componentes en pequeñas proporciones como: proteínas, lípidos, grupos fosfato y trazas de materiales inorgánicos; tanto la fuente botánica y las condiciones de almacenamiento de los almidones determinan el contenido de estos compuestos que imparten efectos drásticos en la propiedades fisicoquímicas (Moorthy, 2002).

3.2.2.1. Características de la amilosa

Se trata de un polímero lineal de α -D-glucosa unida por enlaces α -1.4. Debido al enlace α -1,4 los anillos de glucosa no se encuentran en una misma zona plana por lo que la amilosa no es una cadena plana sino que forma un ángulo con cada glucosa con su interior, dando lugar a un hélice tubular estabilizada con puentes de hidrógeno. La amilosa se presenta en forma cristalina debido al gran número de enlaces por puentes de hidrógeno existentes entre grupos hidroxilos (Ferrerías, 2009), en la Figura 1, se observa la estructura de la amilosa.

La abundancia de los hidroxilos otorga propiedades hidrofílicas al polímero, impartándole afinidad por el agua. Sin embargo, debido a su linealidad, los polímeros de la amilosa tienden a agruparse muy estrechamente en forma paralela mediante formación de puentes

de hidrógeno entre los hidroxilos de los polímeros adyacentes reduciendo así su afinidad por el agua (Naranjo y Pazmiño, 2010).

La amilosa se caracteriza porque favorece la retrogradación de sus pastas durante el enfriamiento, ocasionando el indeseable fenómeno de sinéresis (Hoover, 2002). El contenido de amilosa en almidones de papa es aproximadamente de 20 a 22% (Badui Dergal, 2006), las diferencias del contenido de este polisacárido se debe a diversos factores como genotipo, condiciones ambientales o métodos de aislamiento del almidón (Kaur, Singh, Ezequiel, & Guraya, 2007); también los cambios de este polisacárido se debe a que el porcentaje es proporcional a tamaño del granulo y a la madurez de la planta de la cual se obtuvo el almidón (Utrilla Coello, Agama Acevedo, Rodríguez Ambriz, & Bello Pérez, 2007).

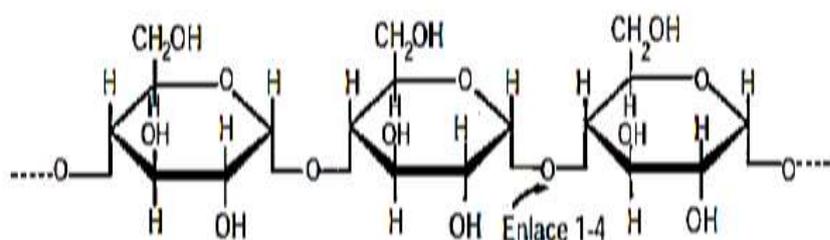


Figura 1: Estructura química de la amilosa.

Fuente: Badui, (2006).

3.2.2.2. Características de la amilopectina

La amilopectina (Figura 2), es el componente mayoritario del almidón, está formada por cadenas α -D-glucosa unidos por enlaces α -1,4; presenta además enlaces α -1,6, en los puntos de ramificación, los cuales representan de 4-5% de los enlaces totales (Ferrerias, 2009).

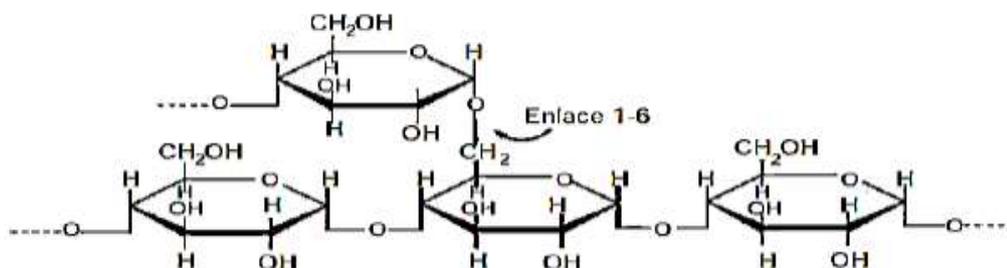


Figura 2. Estructura química de la amilopectina.

Fuente: Badui, (2006).

La amilopectina es una molécula predominante en la mayoría de los almidones dependiendo a la fuente (entre 70-80 %), alcanzando en ciertos casos, niveles de hasta

98-99 % en los almidones tipos cerosos, posee porciones cortas y largas lo cual permite un arreglo único que imparte propiedades cristalinas y propicia su acomodo dentro de los gránulos de almidón, las ramificaciones tienen un arreglo helicoidal similar al que presenta la amilosa. Sin embargo, no se favorece la formación de complejos con sustancias. Además, las ramificaciones no permiten una retrogradación acelerada de esta fracción y no favorecen a la formación de gel (García, 2009).

La amilopectina no tiene estructura micro-cristalina, presentando un grado de cristalinidad inferior al de la amilosa. Es la responsable de la pegajosidad y viscosidad del almidón, debido a que durante la cocción absorbe una importante cantidad de agua, siendo la responsable del hinchamiento del gránulo de almidón, sin embargo, no interviene en la formación del gel, por lo tanto no retrograda (Villagra, 2010). La amilopectina presenta pastas espesas que no se retrogradan fácilmente al enfriarse (Hoover, 2002).

3.2.3. Propiedades tecnofuncionales del almidón

El almidón proveniente de una misma fuente botánica es una mezcla integrada por gránulos de distinto tamaño, los cuales difieren tanto en su composición química como en sus propiedades endotérmicas que finalmente repercuten en las características particulares de cada tipo de almidón. Los gránulos pequeños presentan un mayor contenido de amilosa en comparación con los gránulos de mayor tamaño (Pomeranz, 1991).

Los almidones nativos presentan propiedades funcionales que pueden ser deseables para ciertas aplicaciones (Duxbury, 1989); la gelatinización, retrogradación, birrefringencia, difracción de rayos X, solubilidad, claridad, viscosidad, capacidad de retención de agua e hinchamiento, son fenómenos que pueden ayudar a explicar la estabilidad del biopolímero y por tanto sugerir su aplicación adecuada (Torre *et al.*, 2008).

Cuando el almidón se somete a tratamientos hidrotérmicos, sufre cambios fisicoquímicos y estructurales, que provocan cambios en la organización de las moléculas de amilosa y la amilopectina: Debido a que son calentados a temperaturas cercanas a la gelatinización (70 °C), en la cual los enlaces de puente de hidrogeno que hay entre la región cristalina de los gránulos son destruidos, posteriormente se lleva a cabo la introducción de agua e hidratación de los segmentos de las moléculas de amilopectina, esto es el resultado del hinchamiento y solubilidad de sus componentes (Whistler *et al.*, 1984). La desorganización estructural de los almidones se explica mediante los estudios de gelatinización y retrogradación.

El almidón presenta una alta estabilidad y organización debido a las múltiples interacciones que existen entre la amilosa y la amilopectina, esto ocasiona que sea insoluble en agua fría; sin embargo, cuando se calienta en exceso de agua (>70%) ocurre una pérdida de cristalinidad; originando que la forma semicristalina cambie a una forma eventualmente amorfa (Tester y Debon, 2000).

Gelatinización

La gelatinización del almidón es un proceso que se da en presencia de agua en el cual, se pasa de un estado ordenado (estructura cristalina) a un estado desordenado en el que se absorbe calor (Figura 3); es decir, la gelatinización transforma a los gránulos insolubles del almidón, en una solución de sus moléculas constituyentes (amilosa y amilopectina) en forma individual (Badui, 2001).

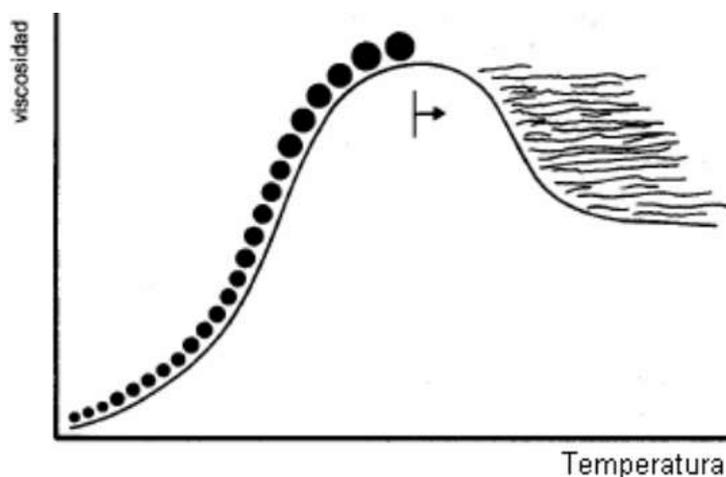


Figura 3: Gelatinización del almidón

Fuente: Badui (2001).

La gelatinización total del gránulo tal como se muestra en la Figura 03, se produce dentro de un intervalo amplio de temperatura. Según Biliaderis (1991) que son tres los procesos que constituyen a este fenómeno. Estos procesos son fenomenos fuera del equilibrio que a su vez resultan en los fenómenos meta-estables de gelatinización, gelación y retrogradación del almidón. Estos fenomenos son:

- i. Difusión del agua dentro del gránulo de almidón; cuando empieza a absorber agua, los puentes de hidrógeno de la región amorfa se rompen permitiendo que el agua se asocie con los grupos hidroxilos libres.
- ii. Fusión de la región amorfa; se caracteriza por una transición hélice-enrollamiento al azar que es facilitada por la hidratación, las cadenas de amilosa se difunden en medio

acuoso y tienen una mayor movilización molecular dentro del gránulo, en este punto el hinchamiento es reversible (Tester y Debon 2000) y las propiedades ópticas del gránulo no se pierden, por ejemplo la birrefringencia.

- iii. Desintegración de las zonas cristalinas cuando el calentamiento es continuo; en este punto el hinchamiento llega a ser irreversible debido a la disociación de las dobles hélices propias de la región cristalina (amilopectina) hasta que finalmente se pierde su estructura (Lai y Kokini 1991). La amilosa fuera del gránulo forma una malla tridimensional y produciendo un gel (Biliaderis 1991).

Así la temperatura a la cual ocurre este proceso se le conoce como temperatura de gelatinización (Tg); cuando la cantidad de agua es limitada, no ocurre una gelatinización completa en el intervalo usual de temperatura; sin embargo, conforme la temperatura se incrementa las regiones cristalinas se funden (Tester y Debon 2000).

Este hinchamiento de los gránulos de almidón es reversible hasta una cierta temperatura conocida como temperatura de gelatinización, la cual es característica de cada tipo de almidón y corresponde a la temperatura a la cual se alcanza el máximo de viscosidad (Debet y Gidley, 2006)

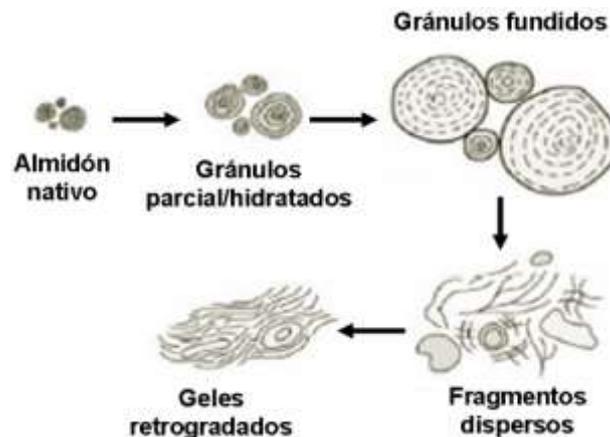


Figura 4: Modificación del almidón sometido a hidrocaldentamiento

Fuente: Rooney y Huang, (2001)

3.3. NOPAL

El nopal, es una cactácea que se encuentra presente en zonas áridas y semiáridas, con gran diversidad de especies y amplia distribución geográfica, es una planta arbustiva, rastrera o erecta, que se ubica en zonas templadas-semiáridas y tropicales secas, que pueden alcanzar de 3 a 5 m de altura. Su tronco es leñoso y mide entre 20 y 50 cm de

diámetro. Sus hojas están formadas por cladodios de 30 a 60 cm de largo por 20 a 40 cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor (Zamora, 2011). El cladodio recibe el nombre de nopalito, cuando los brotes son tiernos entre 3-6 meses y 10 a 15 cm de largo, y de pencas cuando se encuentran parcialmente lignificados (cladodios de 2-3 años) (Sáenz et al., 2006).

3.3.1. Características nutritivas del nopal

El nopal por su parte, al igual que otras verduras, contribuye con una alta proporción de agua a la dieta y son altamente cotizados por su contenido en fibra; forman parte de la dieta común en países como México y están siendo ampliamente consumidos en el sur de Estados Unidos de América por la población mexicana allí residente. Esta verdura, es rica en fibra dietética y su contenido es comparable al de varias frutas y hortalizas, entre ellas la espinaca, la alcachofa, la acelga, la berenjena, el brócoli, el rábano y otras.

Entre las frutas, es similar al mango, al melón, al damasco y a la uva (Orozco, 2017). 1990; Muñoz *et al.*, (1995) señalan que al igual que otras hortalizas, los nopales tienen un alto contenido de agua (90,1 por ciento), bajo contenido de lípidos, hidratos de carbono y proteínas y alto contenido de fibra (0,3; 5,6; 1,7 y 3,5 por ciento, respectivamente). Son ricos también en minerales, entre ellos el calcio y el potasio (93 y 166 mg/ 100 g), respectivamente y tienen bajo contenido de sodio (2 mg/100 g), lo que es una ventaja para la salud humana. Su alto contenido en calcio, los hacen muy interesantes por la importancia de este mineral en la dieta, pero es un problema que debe ser más investigado. *McConn et al.*, (2004) en un estudio efectuado en nopalitos señalan, sin embargo, que el calcio presente no estaría disponible para la utilización por el cuerpo humano, ya que se encuentra bajo forma de cristales de oxalato de calcio. Contiene, además, cantidades moderadas de carotenoides (30 µg/100 g) y de vitamina C (11 mg/ 100 g) (Rodríguez-Félix y Cantwell, 1988). Cantwell (1999) indica que se puede comparar el valor nutritivo de los nopalitos frescos con el de la lechuga o de la espinaca, con la ventaja de que pueden ser producidos en forma rápida y abundante por plantas expuestas a altas temperaturas y con poca agua, condiciones en general desfavorables para la producción de hortalizas de hoja.

3.3.2. Mucilago de nopal

Los mucílagos son polisacáridos de origen vegetal que pertenece a la familia de las cactáceas, este compuesto se encuentra presente tanto en los cladodios como en la piel y pulpa de la fruta pero en diferentes proporciones, presentan algunas características especiales como capacidad de retención de agua por ser hidrocoloide. Su extracción puede

llevarse a cabo por procesos físicos y químicos que nos permiten obtener el mucílago purificado en polvo. (Espino-Díaz *et al.*, 2010).

Este hidrocoloide presenta un interesante potencial como ingrediente para la industria alimentaria y no alimentaria. Sus propiedades tecnofuncionales, principalmente reológicas (viscosidad), (León-Martínez *et al.*, 2010).

Desde el punto de vista de su estructura química, el hidrocoloide es un hetero-polisacárido con un peso molecular entre $2,3 \times 10^4$ - 3×10^6 g mol⁻¹ y presenta una mezcla de monosacáridos ácidos y neutros, principalmente arabinosa (42-42,6%); galactosa (21-40,1%); ácido galacturónico (8-12,7%); ramnosa (7-13,1%) y xilosa (22-22,2%) (Medina-Torres *et al.*, 2000; Sáenz *et al.*, 2004). La proporción de estos monómeros en la molécula depende de diversos factores, como variedad, edad, condiciones ambientales y metodología empleada para la extracción, considerando que sea desde el fruto, cáscara o cladodio, entre otros, tiene la capacidad de formar redes moleculares y retener fuertemente grandes cantidades de agua (Ruiz y Guerrero, 2009), por otra parte Sáenz (2016), menciona que el mucílago permiten la remoción de metales pesados (Fe, Al, Mn).

Adicionalmente, el mucílago contiene una considerable cantidad de ácido galacturónico (8.4 %), el cual tiende a asociarse fuertemente en presencia de iones calcio, presentando una estructura ampliamente ramificada (Figura 5), cuyas unidades de azúcares del mucílago forman un polisacárido ramificado de ácido galacturónico y ramnosa como unidades centrales, las cadenas laterales tienen a su vez un esqueleto formado de alfa galactosa el cual se encuentra unido a ramnosas en el eje central, y ramificaciones laterales con unidades de arabinosa, xilosa y galactosa (McGarvie y Parolis, 1981),

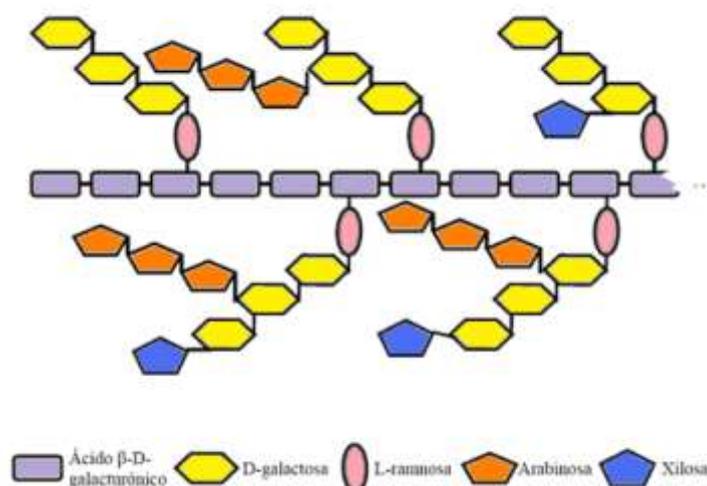


Figura 5: Distribución estructural del mucílago de nopal

Fuente: Cárdenas *et al.* (1997).

3.3.3. Propiedades del mucilago de nopal

Los mucilagos en contacto con el agua forman unas dispersiones viscosas y poseen una enorme facilidad de embeberla; propiedad de suma importancia en el mecanismo de retención del agua de las cactáceas. Los mucilagos están contenidos dentro de las grandes células vesiculares de los parénquimas. En México el mucilago se ha usado con cal (Óxido de calcio (CaO)) puesto que de acuerdo con Cárdenas et al., (1998) aumenta sus propiedades adhesivas y mejora su repelencia al agua, siendo esta mezcla aplicada en monumentos y edificios históricos.

3.4. LA PECTINA

Las sustancias pécticas son mezclas complejas de polisacáridos que constituyen una tercera parte de la pared celular de las plantas dicotiledóneas y de algunas monocotiledóneas (Jarvis *et al.* 1988), menor proporción de estas sustancias se encuentran en las paredes celulares de las plantas herbáceas. El principal constituyente de los polisacáridos pécticos es el ácido o-galacturónico unido en cadenas por medio de enlaces glicosídicos α -(1-4). Hay monómeros de ramnosa insertados dentro de la cadena principal de residuos de ácido galacturónico, unidos al extremo reductor de los mismos por enlaces (1 α -2 β), y al extremo no reductor del siguiente residuo urónido por enlaces (1 β -4 α) La ramnosa introduce un plegamiento en la que sería una cadena estirada. Otros monómeros serían: galactosa, arabinosa, xilosa, ácido glucurónico y fucosa que conformarían la estructura.

3.4.1. La gelificación de la pectina

Desde el punto de vista de la tecnología alimentaria la propiedad más importante de las pectinas es su aptitud para formar geles. Los geles consisten en moléculas poliméricas con enlaces entrecruzados para formar una red interconectada y tupida inmersa en un líquido (Flory, 1953). En geles de pectina y otros sistemas de alimentos conteniendo pectina, este líquido es agua. Las propiedades del gel son el resultado neto de interacciones complejas entre el soluto y solvente. La influencia del agua como solvente, la naturaleza y magnitud de las fuerzas intermoleculares que mantienen la integridad del gel permiten tener una gran capacidad de retención de agua (Pagan, 1999).

3.4.2. Factores que influyen en la gelificación de la pectina

Según Pagan (1999), los factores de los medio más importantes que influyen en la formación del gel son la temperatura, pH, azúcar y otros solutos, y los iones calcio

Temperatura. Cuando se enfría una solución caliente que contiene pectina las energías térmicas de las moléculas decrecen y su tendencia a gelificar aumenta. Cualquier sistema que contenga pectina, tiene un límite superior de temperatura por encima de la cual la gelificación nunca ocurrirá. Por debajo de esta temperatura crítica, las pectinas de bajo metoxilo gelifican casi instantáneamente mientras que la gelificación de las de alto metoxilo depende del tiempo. En contraste con las pectinas de bajo metoxilo, las de alto no son termorreversibles.

pH. La pectina es un ácido con un pK de aproximadamente 3,5. Un porcentaje alto de grupos ácido disociados respecto a no disociados hace la pectina más hidrofílica. Por lo tanto, la tendencia a gelificar aumenta considerablemente al bajar el pH.

Esto se hace especialmente evidente en pectinas de alto metoxilo las cuales requieren normalmente un pH por debajo de 3,5 para gelificar.

El azúcar y otros solutos similares. Estos hidratos de carbono, tienden generalmente a deshidratar las moléculas de pectina en solución. Cuantos más sólidos en solución hay, menos agua disponible para actuar como disolvente de la pectina y por lo tanto la tendencia a gelificar se favorece. En valores de sólidos solubles superiores al 85% el efecto deshidratante es tan fuerte que la gelificación de la pectina es muy difícil de controlar. Las pectinas de alto metoxilo gelifican a valores de sólidos solubles por encima del 55%. Para cada valor de sólidos solubles superior al 55% hay un valor de pH en el cual la gelificación es óptima y un rango de pH en el que en la práctica se puede gelificar. Las pectinas de bajo metoxilo pueden gelificar a cualquier valor de sólidos solubles.

La temperatura de gelificación disminuye al disminuir el contenido en sólidos solubles.

Los iones calcio. Al contrario que las pectinas de alto metoxilo, las pectinas de bajo metoxilo desesterificadas requieren bastante calcio y un rango estrecho de dicho catión para una óptima gelificación. Las pectinas de bajo metoxilo amidadas muestran más flexibilidad a este respecto. Para ambos tipos de pectina, un incremento en la concentración de calcio implica un aumento de la fuerza del gel y también un aumento de la temperatura de gelificación.

3.5. PLASTIFICANTES

Además de los componentes de naturaleza polimérica, otro componente importante de las películas comestibles son los plastificantes. Estos son moléculas pequeñas de bajo peso molecular, de baja volatilidad. Se usan para mejorar la flexibilidad y la funcionalidad de los recubrimientos.

Dentro de los agentes plastificantes utilizados más frecuentemente se encuentra glicerol, polietilenglicol, sorbitol, aceites, ácidos grasos, ceras, entre otros., siendo el glicerol el plastificante más utilizado en las formulaciones a base de polisacáridos y proteína. Aumenta la flexibilidad de los recubrimientos al aumentar el volumen libre o la movilidad molecular de los polímeros ya que reducen los enlaces de hidrogeno internos entre las cadenas de polímeros.

Los polímeros afectan la capacidad de atracción de agua al sistema y generalmente suelen aumentar la permeabilidad al oxígeno en los recubrimientos comestibles (Krochta *et al.*, 1994).

3.5.1. Glicerol

El glicerol es un compuesto químico, también llamado glicerina. Es un líquido viscoso, sin olor ni color y ampliamente usado en la industria farmacéutica. El glicerol posee tres grupos hidroxilos que son responsables de su solubilidad en agua y su naturaleza hidrosópica (Figura 6). Es el componente central de algunos lípidos, el L glicerol es ligeramente dulce y de baja toxicidad.

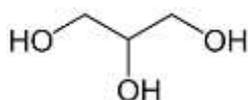


Figura 6: Estructura del glicerol

Debido a los grupos hidroxilo (-OH) en su estructura, el glicerol es capaz de vincularse a través de puentes de hidrogeno con las cadenas del almidón, impidiendo el completo ordenamiento de las mismas debido a que se interponen entre éstas. El efecto global del reemplazo de interacciones polímero-polímero por interacciones plastificante-polímero es la reducción de la rigidez de las películas. El tamaño molecular, la configuración y el número total de grupos -OH funcionales del plastificante, como también su compatibilidad con el polímero, afectan el tipo y cantidad de interacciones entre el plastificante y las cadenas poliméricas (Yang y Paulson, 2000).

3.6. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE BIOPELÍCULAS

Las películas comestibles pueden presentar diferentes características y propiedades dependiendo de la formulación y del proceso de fabricación.

3.6.1. Propiedades de barrera al vapor de agua

La protección del alimento contra alteraciones provocadas por el medio ambiente desde su obtención hasta llegar al consumidor es una de las preocupaciones más importantes actualmente (Martín-Polo *et al.* 1992). La migración de vapor de agua es uno de los principales factores de alteración de la calidad sensorial y de la estabilidad del almacenamiento (Chen, 1995).

El coeficiente de permeabilidad al vapor de agua es definido como la transferencia del vapor permeable a través de un material. La transferencia de agua en materiales poliméricos ocurre por difusión molecular. Ese proceso se desarrolla en tres etapas: (1) movimiento del permeable para la superficie de la estructura de la película y su adsorción dentro de la matriz polimérica; (2) difusión a través de los poros formados por el movimiento de la cadena polimérica de la película o, en la propia fabricación y (3) evaporación a partir de la superficie de la película y su consecuente dispersión en el aire (Kester y Fennema, 1986).

La eficiencia de las propiedades de barrera de las películas emulsionadas depende de la característica del componente lipídico, particularmente la hidrofobicidad, organización del complejo proteína-lípido, interacción entre esos dos componentes y distribución uniforme de las sustancias hidrofóbicas en la matriz (Gontard *et al.*, 1994).

3.6.2. Propiedades de barrera a gases

La transferencia de oxígeno del medio ambiente para el alimento tiene gran importancia en la calidad del mismo y en su vida de anaquel. El oxígeno causa deterioro del alimento, modificando las características sensoriales y nutricionales (Krochta y Mulder-Johnston, 1997), y puede influenciar de forma significativa en su estabilidad durante el almacenamiento. La deterioración debido a la permeabilidad al oxígeno ocurre en muchos productos alimenticios, envolviendo la oxidación de lípidos, vitaminas, compuestos de sabor y pigmentos (Kester y Fennema, 1989).

La deterioración de los alimentos promovida por la oxidación y respiración puede ser controlada a través del uso de películas comestibles, estando directamente relacionada a la permeabilidad al oxígeno y al gas carbónico.

El oxígeno y gas carbónico son dos gases, que están directamente relacionados con conservación de frutas frescas y vegetales así como alimentos conteniendo lípidos (Chen, 1995).

El desarrollo de películas y coberturas comestibles con permeabilidad selectiva de gases es potencialmente interesante en el control de la respiración, en el efecto de la atmósfera modificada, las cuales promueven un aumento en la preservación de las frutas (Gontard *et al.*, 1996).

3.6.3. Propiedades mecánicas

Las principales propiedades mecánicas de las películas son la resistencia a la tracción y la elongación. La resistencia a la tracción es expresada por la tracción máxima desarrollada por la película en una prueba de tracción. La elongación es la habilidad de la película en extenderse. Las películas obtenidas deben ser resistentes a la ruptura y la abrasión, haciendo con que el alimento no pierda su integridad y protección por manipulación y transporte. Además de eso, deben poseer flexibilidad, lo suficiente para adaptarse a la eventual deformación en el alimento sin daño mecánico (Gontard *et al.*, 1994).

Las propiedades mecánicas están directamente relacionadas con la naturaleza del material filmogénico utilizado y con la cohesión de la estructura de la matriz polimérica, que está relacionada con la distribución y concentración inter e intramoleculares en la estructura filmogénica entre las cadenas de proteínas (Cuq *et al.*, 1998).

3.6.4. Propiedades físicas

Las propiedades físicas permiten conocer el comportamiento de las películas frente a condiciones de manipulación que pudieran suscitar, por ejemplo durante el contacto con medios acuosos o ambientes corrosivos, por ello es necesario conocer la solubilidad en agua y la resistencia a disolventes, otro aspecto físico son la propiedades ópticas evaluadas en muchos casos a través del color y como consecuencia el grado de opacidad que la película podría entregar a un alimento y generar cambios en las características propias de este (Orozco, 2017)

Solubilidad

El estudio de la solubilidad de los polímeros en diferentes disolventes es importante a la hora de especificar su resistencia a determinados ambientes, así como en aplicaciones en las que el polímero se encuentra en disolución. Además la caracterización macromolecular (determinación de masas moleculares promedio, distribución de pesos moleculares,

polidispersidad y dimensiones) se realiza fundamentalmente a través de medidas de propiedades físicas de disoluciones de polímeros.

Debido al gran tamaño de las moléculas, la solubilidad de los polímeros es más compleja que la de los compuestos de bajo peso molecular. La forma de proceder la disolución es ya diferente, en este caso son las pequeñas moléculas de disolvente las que en una fase inicial penetran la muestra del material hinchándole y formando un gel, únicamente en el caso de polímeros no reticulados (termoplásticos), el proceso continúa hasta formar una verdadera disolución en la que se encuentran separadas las macromoléculas. Cada una de las cadenas forma un ovillo más o menos solvatado por el disolvente según la calidad del mismo. Si el polímero es reticulado (entrecruzado covalentemente) el proceso se detiene en la fase de hinchamiento, la acción del disolvente no llega a separar las cadenas y en lugar de una disolución tenemos un gel. El grado de hinchamiento depende de la interacción con el disolvente (cuanto mayor sea la interacción más hinchado estará el gel) y del grado de reticulación del material polimérico (a mayor reticulación menor hinchamiento) (Varela, 1996)

Propiedades ópticas

La mayoría de los polímeros son transparentes e incoloros, por lo que se utilizan como recubrimientos y en envasados que requieran transparencia. Las propiedades ópticas están relacionadas con la estructura química y la morfología del material.

Cuando la luz incide sobre una muestra parte es reflejada, parte puede ser absorbida, parte puede ser dispersada y la fracción restante será transmitida. La claridad óptica y transparencia están relacionadas con la cantidad de luz que es transmitida por la muestra, y esta será tanto menor cuanto mayor sea la luz que se refleja.

La absorción de luz es característica de la estructura electrónica de cada polímero, la energía electromagnética de una determinada frecuencia se puede absorber por excitación a niveles electrónicos superiores. Al producirse a frecuencias fijas es la que da lugar al color. Los polímeros son generalmente incoloros por no absorber la luz visible, aunque si absorben la radiación UV, lo que puede ser el inicio de degradaciones. Cuanto mayor es el espesor de la muestra mayor es la absorción. Los polímeros se pueden colorear con la adición de tintes que absorban las radiaciones adecuadas dejando pasar las correspondientes al color deseado (Varela, 1996).

3.7. MARCO CONCEPTUAL

Biopelícula

Capa continua, simple y delgada de un material orgánico que a menudo se coloca en las superficies de los alimentos con la finalidad de preservar sus características fisicoquímicas.

Plastificante

Materiales básicos que se agregan a estas membranas con el fin de formarlas. Estos materiales tienen la particularidad de reducir las fuerzas intermoleculares, incrementar la movilidad de las cadenas de biopolímeros y mejorar las propiedades mecánicas de las películas.

Almidón

El almidón es el principal carbohidrato de reserva sintetizado por las plantas superiores, constituyendo una fuente de energía esencial para muchos organismos, especialmente el hombre; representa una fracción importante en un gran número de productos agrícolas.

Mucilago de nopal

El mucilago del nopal es un polisacárido fibroso, altamente ramificado, cuyo peso molecular oscila alrededor de 13×10^6 g/mol. Contiene aproximadamente de 35 a 40 % de arabinosa, 20 a 25% de galactosa y xilosa cada una, y de 7 a 8% de ramnosa y ácido galacturónico cada uno (Medina-Torres *et al.*, 2000).

Pectina

La pectina es una sustancia neutra, no cristalizable, incolora y soluble en el agua que existe en los frutos maduros, como resultado de la transformación de la pectosa (Badui, 2006)

Glicerol

Compuesto químico también llamado glicerina, utilizado en la formación de films generalmente como plastificante.

Propiedades mecánicas

Se refiere al comportamiento mecánico de los materiales, las principales propiedades mecánicas de las películas son la resistencia a la tracción y la elongación.

Propiedades físicas

Se refiere al comportamiento físico de los materiales, las principales propiedades físicas de los materiales son: solubilidad, opacidad y permeabilidad.

Opacidad

La opacidad da lugar a un aspecto blancuzco de la película reduciendo su transparencia. Ello puede determinarse midiendo la cantidad de luz que difunde o atraviesa la película.

Solubilidad

Capacidad de una sustancia o un cuerpo para disolverse al mezclarse con un líquido.

Disolventes

Un disolvente o solvente es una sustancia química en la que se diluye un soluto (un sólido, líquido o gas químicamente diferente), resultando en una disolución; normalmente es el componente de una disolución presente en mayor cantidad.

CAPÍTULO IV

4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. LUGAR DE ESTUDIO

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo en los laboratorios de química y control de calidad de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional José María Arguedas (UNAJMA), ubicado en la unidad vecinal de Santa Rosa, distrito de Talavera, provincia de Andahuaylas del departamento de Apurímac.

Por otra parte se consideró los servicios de laboratorio de Química de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, para la evaluación de las propiedades mecánicas.

4.2. MATERIA PRIMA

Estuvo referido a los cladodios de nopal, a partir del cual se obtuvo mucilago, estos cladodios provinieron de las plantaciones silvestres ubicados en el distrito de Talavera.

El almidón de papa se extrajo a partir de papa nativa de la variedad Yana palta, procedente del mercado local de la ciudad de Andahuaylas.

4.3. MATERIALES, INSTRUMENTOS Y EQUIPOS

a) Equipos e instrumentos

Los equipos e instrumentos que se utilizaron se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Equipos e instrumentos

Cantidad	Equipos e instrumentos
01	Micrómetro digital
01	Estufa
01	Cámara fotográfica
01	Cronómetro digital
01	Balanza digital de sensibilidad 0.01g
01	Balanza electrónica digital de 0.2 a 30 Kg.
01	Termómetro digital de 50 °C hasta +300 °C
01	Colorímetro

b) Materiales

Los materiales utilizados se muestran en la Tabla 2

Tabla 2: Materiales

Cantidad	Materiales
03	Varilla de vidrio
01	Paquete papel tissue
05	Mortero con pilón
25	Vasos precipitados de 50, 100, 500 y 100mL
10	Pipetas de 5 mL, 10 mL
02	Micropipetas de 5 y 10 μ L
02	Fiolas (10 a 250 mL)
02	Espátula mediana y pequeña
06	Probetas de 50, 100, 250 mL.
02	Pizetas.
01	Rotulador
06	Rollos de papel aluminio
09	Matraz Erlenmeyer de 100mL, 500 mL y 1000 mL
01	Desecador
33	Capsulas de porcelana
04	Tamices de 250 y 500 μ m

c) Reactivos e insumos

Los reactivos e insumos utilizados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Reactivos e insumos

Cantidad	Reactivos e insumos
500 g	Glicerina
500 g	Pectina cítrica
20 L	Etanol de 96°
20 L	Agua destilada
50 mL	Ácido clorhídrico 0.1 M
50 mL	Ácido acético 0.1 M
50 mL	Hidróxido de sodio 0.1 M
50 mL	Eter de petróleo Q.P.

4.4. POBLACIÓN, MUESTRA, TIPO DE MUESTREO, UNIDAD DE ANÁLISIS

4.4.1. Población

La población a estudiar fueron las películas elaboradas a partir de almidón de papa, pectina, mucilago de nopal y un plastificante como la glicerina, las cuales fueron sometidas

a pruebas para determinar sus propiedades físicas y mecánicas. La población estuvo constituida por el total de biopelículas elaboradas que fueron 50 g de cada formulación.

4.4.2. Muestra

Se seleccionaron alrededor de 20 gramos de biopelícula por cada tratamiento o formulación, para realizar la caracterización y evaluar las propiedades físicas y mecánicas.

4.4.3. Tipo de muestreo

Se realizó un muestreo no probabilístico, que consistió en tomar películas del biopolímero sintetizado por cada formulación o tratamiento.

4.5. TIPO DE INVESTIGACIÓN

- Investigación básica

La investigación fue de tipo básica, debido a que se evaluó las propiedades físicas y mecánicas de las películas elaboradas a partir de almidón de papa y mucilago de nopal, para lo cual fue necesario la aplicación de conceptos teóricos y científicos pertinentes al tema y a la ingeniería agroindustrial, así mismo fue de carácter descriptiva ya que se aplicaron los resultados encontrados en comparación con los antecedentes.

- Según la manipulación de variables

Experimental

Debido a que se manipulo variables de estudio: almidón de papa y mucilago de nopal, el cual se denominará factor o fuente de variabilidad. Asimismo se consideró experimental debido a que se aleatorizará los experimentos o tratamientos a fin de obtener muestras representativas, esto se representó a través de una matriz de diseño experimental.

- Según el periodo temporal

Transversal

Será transversal debido a que tomo los datos de las propiedades físicas y mecánicas de las películas elaboradas a partir de almidón de papa y mucilago de nopal.

4.6. MÉTODOS Y TÉCNICAS

4.6.1. Métodos

a) Extracción de almidón de papa

Para la extracción del almidón se empleó la metodología con modificaciones propuesta por Melian (2010).

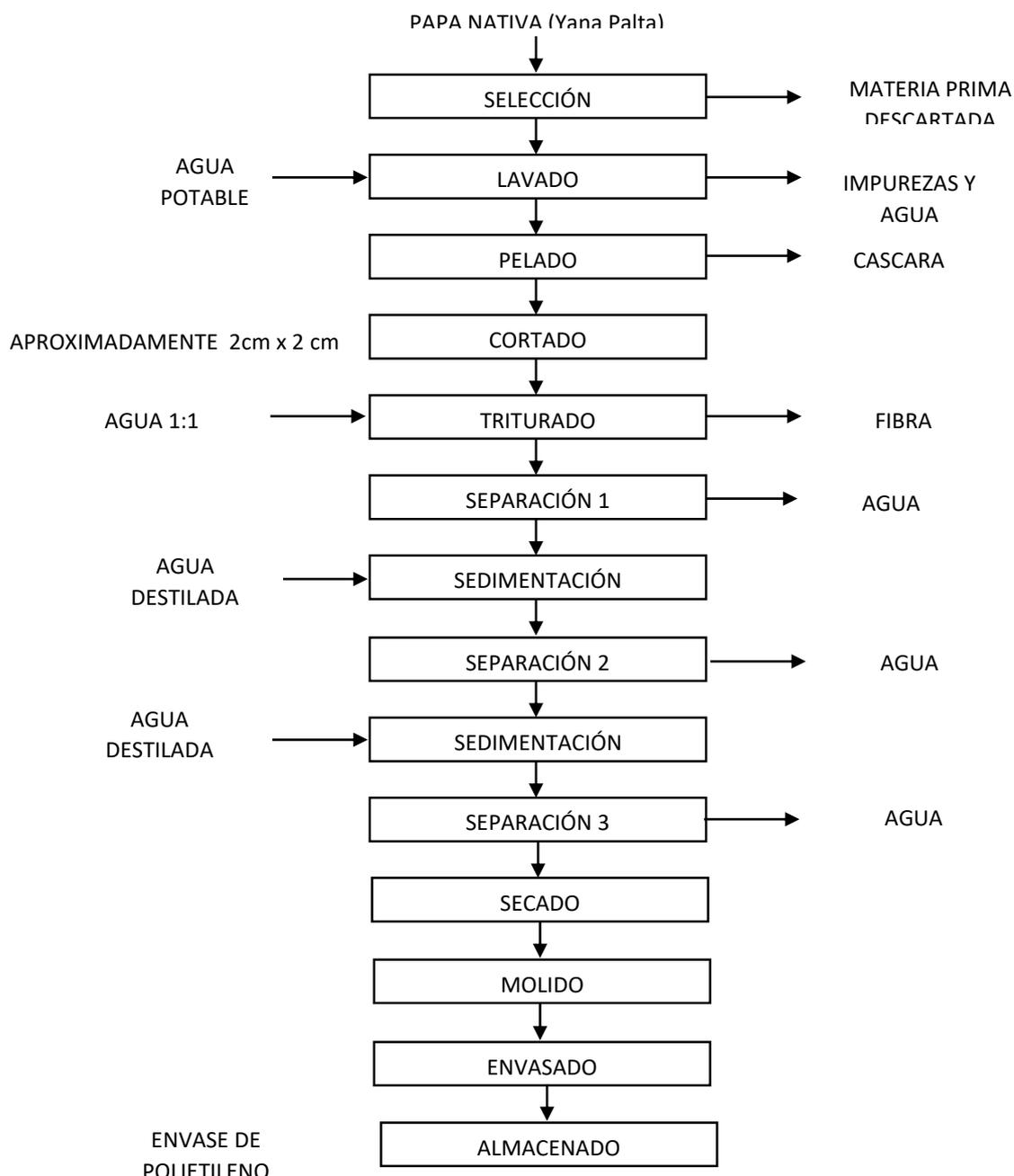


Figura 7: Diagrama de bloques del proceso de extracción de almidón de papa nativa.

Fuente: (Melian, 2010).

El método consistió en lavar las papas con agua potable y cortarlas en cuadros de aproximadamente 5 cm de lado. Luego la papa cortada fue molida (proporción agua: papa; 1:1) para obtener una alícuota. La alícuota se sometió a un filtrado empleando una muselina y adicionando agua destilada para arrastrar la mayor cantidad de almidón presente. La muestra se decantó por 4 horas ambiente hasta obtener una capa firme de almidón en el fondo, finalizada la primera decantación, se retiró el sobrenadante y se agregó agua hasta obtener un sobrenadante claro. La muestra se llevó a una estufa para su secado a 45 ± 2 °C por 14 horas, posteriormente se tamizó a través de un tamiz de 500 y 250 μm respectivamente.

b) Extracciones mucilago de nopal

Para la extracción y purificación del mucilago de nopal se empleó la metodología con modificaciones, propuesta por Abraján (2008).

El método consistió en lavar los cladodios con agua, retirar la piel y cortar los cladodios en cuadros de aproximadamente 1 cm de lado. Luego el nopal cortado estuvo en reposo en agua destilada en una relación 1:1 por 24 h, seguidamente se separó la fase líquida y se agregó etanol de 96° a razón de 3 volúmenes, a fin de precipitar el mucílago. Se recogió el precipitado y se llevó a un secador a 70 °C por 24 h. El mucílago seco fue molido en un mortero hasta obtener un polvo fino, y finalmente se pasó por un tamiz de 500 y 250 μm respectivamente, para luego ser empleada como materia prima para la elaboración del biopolímero.

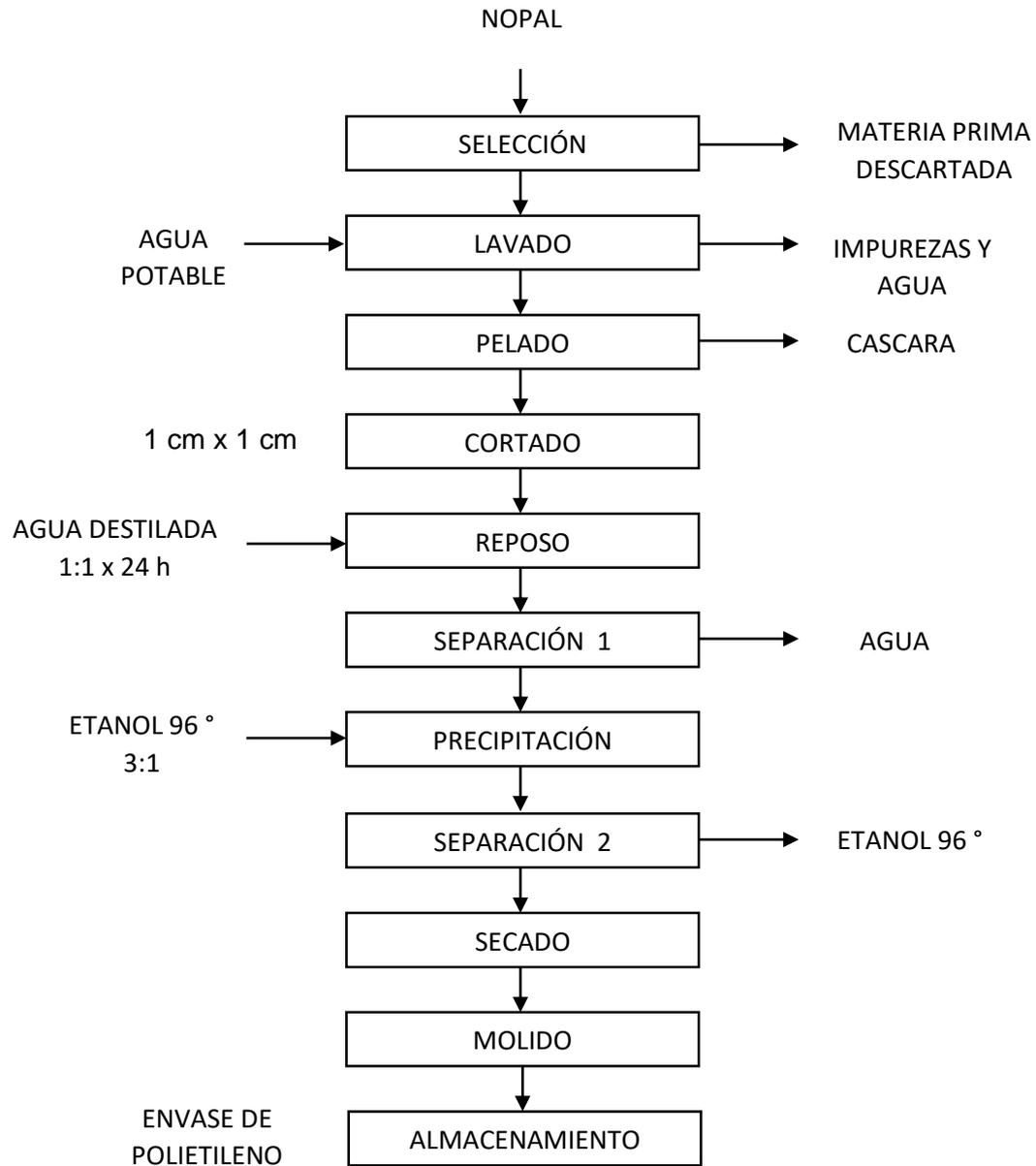


Figura 8: Diagrama de bloques del proceso de extracción de mucilago de nopal.

Fuente: (Abraján, 2008).

c) Elaboración de la biopelícula natural

La formulación de la biopelícula se realizó a través de un diseño de mezclas mostrada en la Tabla 4, a fin de obtener al menos 06 formulaciones.

Primero se preparó una solución al 2% de almidón de papa (AP) a 60°C, la cual se dejó en reposo hasta temperatura ambiente, así mismo se preparó una solución al 2% de Pectina (P) y mucilago al 0.5 % (M)

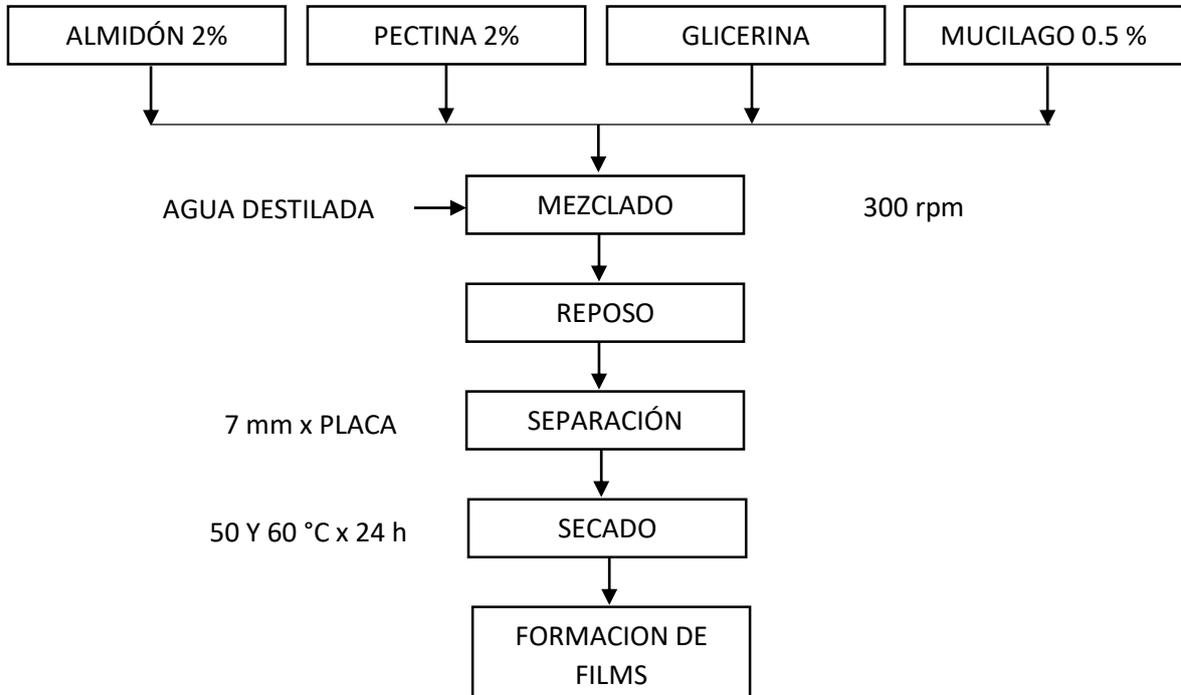


Figura 9: Diagrama de bloques del proceso de elaboración de la biopelícula natural.

De acuerdo a las formulaciones propuestas (Tabla 4), en un matraz se vertió solución AP, y un alícuota de glicerina el cual se mezcló con agitador a 300 rpm por 5 min, en seguida se agregó la solución de P y se agitó por 5 min finalmente se agregó solución de mucilago al 2 % dejando en agitación por 10 min, luego se dejó en reposo por 30 min.

La mezcla se vertió en una placa de vidrio, midiendo el espesor con Vernier (7 mm) y se agitó vigorosamente a fin eliminar burbujas de aire atrapadas, luego se llevó a un secador de bandejas a las temperaturas de 50 y 60 °C por 24 h, posteriormente las muestras secas se llevaron a un desecador por 24 h, para luego ser empacadas en bolsas de polietileno de alta densidad (PEAD).

4.6.2. Técnicas de análisis por objetivos

a) Propiedades físicas de la biopelícula natural

Solubilidad

Se aplicó el método propuesto por Gontard *et al.* (1992), con algunas modificaciones, para lo cual se cortaron y pesaron muestras de biopolímero, que fueron inmersos en agua destilada por un tiempo de 24 h, después de este periodo las muestras se secaron durante 24 h a 105 °C para determinar el peso final. La solubilidad se expresó en términos de porcentaje de material desintegrado.

Opacidad

La opacidad fue calculada a través de un colorímetro triestímulo Minolta, de acuerdo con la relación ($Y = Y_p/Y_b$) entre la opacidad de la muestra sobre un padrón negro (Y_p) y sobre un patrón blanco (Y_b). Las determinaciones fueron realizadas por triplicado (Ortega-Toro *et al.*, 2014).

Color

Para la determinación de color se utilizó un colorímetro Minolta CR-400, el cual fue calibrado, las biopelículas fueron apoyadas sobre placa de fondeo blanco y otra de fondo negro (Krochta, y Mulder-Johston, 1997). Las determinaciones de color fueron hechas por triplicado en cada una de las películas.

Los parámetros medidos correspondieron al sistema CIE Lab, en el cual L indica luminosidad (0 corresponde a negro y 100 corresponde a blanco), los valores positivos de a^* indican rojo y los negativos verde y los valores positivos de b^* indican amarillo mientras que los negativos indican azul.

El índice de amarillo (YI, yellow index) se evaluó considerando las coordenadas CEILAB, la cual fue propuesta por Francis y Clydesdale (1975), a través de la ecuación 1.

$$YI = 142.86 \frac{b^*}{L^*} \dots \dots (1)$$

El índice de blancura (WI, Whiteness Indices), se evaluó considerando las coordenadas CEILAB, a través de la ecuación 2 (CIE, 2004).

$$WI = L^* - 3b^* \dots \dots (2)$$

Mientras que el índice de color (CI) se determinó a través de la ecuación 3:

$$CI = \frac{(ax1000)}{Lxb} \dots \dots \dots (3)$$

Los valores de CI entre -40 y -20 corresponden al rango del color que va desde violeta a verde oscuro; valores entre -20 y -2 corresponden a muestras con colores entre verde oscuro y amarillo verdoso; valores entre -2 y +2 indican color verde amarillento. Por otra parte, CI entre +2 y +20.

Resistencia a disolventes

El comportamiento plástico de la película se observó frente a algunos disolventes, ácidos y bases. Se colocaron muestras de película de 0.5 X 1cm en tubos de ensayo con 2 mL de las siguientes sustancias: agua destilada, acetona, alcohol etílico, ácido clorhídrico (0.1 M), ácido acético (0.1 M) e hidróxido de sodio (0.1 M), respectivamente. Las muestras se mantuvieron inmersas durante 10 h a 20 °C (Vargas *et al.*, 2018).

b) Propiedades mecánicas de la biopelícula

Se determinó el esfuerzo máximo a la ruptura y elongación de los biopolímeros a través de un texturómetro, diseñado y calibrado por el laboratorio de química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, que utilizó la norma ASTM es D638 (D638 M es métrica).

Que consistió en tomar tiras del biopolímero de 1 cm x 7 cm, para luego enganchar cada extremo en las pinzas del equipo, se tomó los datos de tiempo y fuerza. El equipo permitió determinar la fuerza sometida al polímero y medir directamente la elongación de la biopelícula hasta su ruptura máxima, para intervalos de tiempo

El esfuerzo máximo se calculó a través de la ecuación 4:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_t} \dots \dots \dots (4)$$

Donde: σ_{max} , es el esfuerzo máximo (MPa); F_{max} , Fuerza máxima hasta la ruptura (N); A_t , área transversal (mm²).

Para la determinación de la deformación unitaria porcentual se aplicó la ecuación 5:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} \dots \dots \dots (5)$$

Donde: L_f , es la longitud final de la biopelícula en la ruptura (cm); L_0 , longitud inicial del biopelícula (cm).

4.7. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Variables independientes.

Estará referido a los componentes empleados para la formulación de la película, y estas son:

- Almidón de papa
- Pectina
- Temperatura

Variables dependientes

- Características físicas: Solubilidad, opacidad y resistencia a disolventes
- Características mecánicas: Esfuerzo máximo a la ruptura y elongación

4.8. DISEÑO EXPERIMENTAL Y MATRIZ DE DISEÑO

La formulación para la síntesis de la película se realizó siguiendo un diseño experimental de mezclas con restricciones (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

Por otra parte la matriz de diseño de mezclas con restricciones, fue propuesta por él investigador, se utilizó una variación en la concentración de almidón de papa (50 - 70%), mucilago de nopal al (0.5%) al 4% de dilución, para el glicerol (4%) y temperatura de secado de 50 y 60 °C obteniendo un número de 06 unidades experimentales. En la Tabla 4 se muestra las proporciones de cada componente.

Tabla 4: Diseño experimental para la síntesis del biopolímero

Tratamiento	% AP (al 2%)	% P (al 2%)	% G (Q.P.)	% M (al 0.5%)	T (°C)	PROPIEDADES FÍSICAS			PROPIEDADES MECANICAS	
						OPACIDAD	SOLUBILIDAD	RESISTENCIA A DISOLVENTES	ESFUERZO MAXIMO	ELONGACION
T1	50	42	4	4	50	-	-	-	-	-
T2	60	32	4	4	50	-	-	-	-	-
T3	70	22	4	4	50	-	-	-	-	-
T4	50	42	4	4	60	-	-	-	-	-
T5	60	32	4	4	60	-	-	-	-	-
T6	70	22	4	4	60	-	-	-	-	-

4.9. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Para evaluar los efectos de los factores o variables de entrada, se aplicó un ANOVA, así mismo se aplicó el test de comparación múltiple Tukey a fin de conocer e identificar cuál de los tratamientos mostró diferencia significativa.

En todos los casos se considerará los siguientes criterios de prueba:

Nivel de significancia (α)

Para el caso de la evaluación de la correlación de las variables, se empleó un nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Criterio para la prueba de hipótesis

Se rechaza H_0 , si $\alpha > p\text{-value}$

Por otra parte para la aplicación del diseño de mezclas, las restricciones para los componentes en el experimento serán:

$$0 \leq a_i \leq x_i \leq b_i \leq 1$$

donde a_i es la restricción inferior para el componente x_i de la mezcla, y b_i es la restricción superior. En esencia, a_i representa la mínima proporción del i-ésimo componente que debe existir en cualquiera de las mezclas que se probarán en el experimento, y b_i representa el nivel o proporción máxima del i-ésimo componente.

Asimismo, una vez obtenido los resultados experimentales del diseño de mezclas, se realizó el ajuste del modelo estadístico para investigar el efecto de los componentes sobre la variable de respuesta, también se realizó la caracterización de la superficie de respuesta.

Se estimará el modelo propuesto en la fórmula 6:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_i X_i + \beta_j X_j + \beta_k X_k + \beta_{ijk} X_{ijk} + \varepsilon \dots \dots (6)$$

Donde:

Y_i , es la respuesta o variable de salida

β_i , es el coeficiente de la variable i (Almidón)

β_j , es el coeficiente de la variable j (Temperatura)

β_k , es el coeficiente de la variable k (Pectina)

X_i , es la variable i (almidón)

X_j , es la variable i (Temperatura)

X_k , es la variable k (Pectina)

ε , es el error aleatorio

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. SOLUBILIDAD DE LAS BIOPELÍCULAS

En la Tabla 5 se presenta los resultados de la solubilidad de las biopelículas, se observó que los tratamientos presentan alta solubilidad en agua, superiores al 77.14%, siendo el tratamiento T4 (50% AP, 42% P, 4% G, 4% M y 60 °C) el que presenta mayor solubilidad (80.06 ± 0.58 %), mientras que el tratamiento T3 (70% AP, 22% P, 4% G, 4% M y 50 °C) es el que presenta menor solubilidad (77.14 ± 0.85 %), por tanto las réplicas de solubilidad realizadas a cada tratamiento presentan baja variabilidad puesto que el C.V, es menor que 1.10%.

Tabla 5: Solubilidad (%) de las biopelículas

Tratamiento	\bar{X}	\pm	S	C.V. (%)	Dif. Sig.*
T1	80.00	\pm 0.76	0.95	0.95	A
T2	78.77	\pm 0.84	1.06	1.06	AB
T3	77.14	\pm 0.85	1.10	1.10	B
T4	80.06	\pm 0.58	0.72	0.72	A
T5	79.53	\pm 0.87	1.09	1.09	A
T6	78.40	\pm 0.50	0.64	0.64	AB

Donde: \bar{X} , es la media; S, es la desviación estándar; C.V. es el coeficiente de variabilidad.

*Diferencia significativa de Tukey, evaluada al 5% de significancia (Anexo 03)

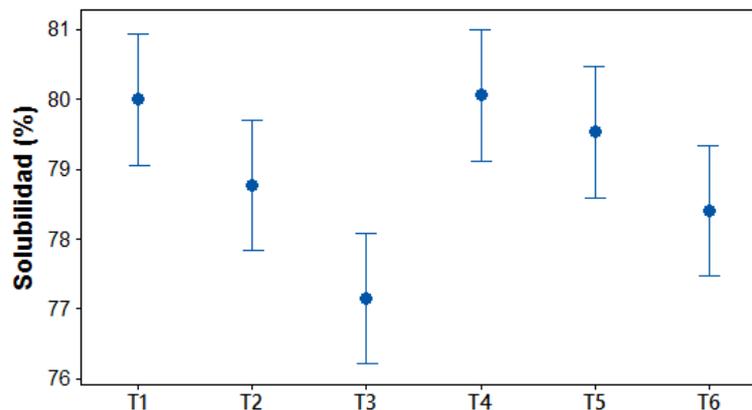


Figura 10: Diagrama de medias de la solubilidad

Por otra parte al aplicar un ANOVA se observó que la solubilidad de los tratamientos presentan diferencia significativa (p -value = 0.003) (Anexo 03), es decir las solubilidades para cada tratamiento es diferente tal como se aprecia en la Tabla 5, de esta manera al realizar la comparación múltiple de Tukey se apreció que los tratamiento T1, T4 y T5 se

agrupan en solubilidades similares, del mismo modo los tratamiento T2, T3 y T6 forman otro grupo, este mismo hecho se puede evidenciar en la Figura 10.

Por otra parte al evaluar los efectos y la interacción de las variables, se apreció que la adición de AP y P presentan diferencia significativa ($p\text{-value} < 0.05$), mientras que la temperatura de secado de la biopelícula no presenta diferencia significativa ($p\text{-value} > 0.05$), tal como se aprecia en la Tabla 6, del mismo modo se observó que la interacción AP-T y P-T no evidencia efectos significativos en la solubilidad de las biopelículas.

Tabla 6: p-value para efectos e interacción en la solubilidad

Fuente	p-value*
%AP	0.001
%P	0.001
T	0.071
%AP*T	0.404
%M*T	0.404

*Los valores proceden de un ANOVA al 5% de significancia (Anexo 03)

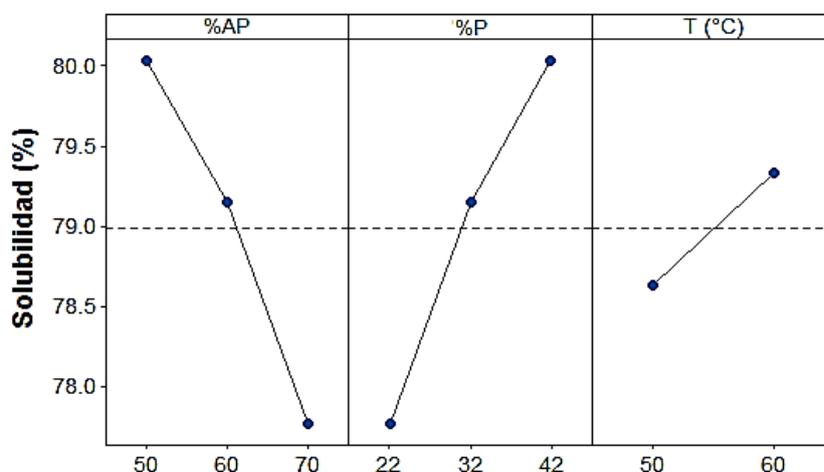


Figura 11: Diagrama de efectos principales para la solubilidad

En la Figura 11, se puede evidenciar el efecto de AP, siendo que el incremento de esta disminuye la solubilidad, por el contrario el incremento de P aumenta en la solubilidad de las biopelículas, en tanto que la temperatura incrementa ligeramente la solubilidad aunque esta no es lo suficiente como para evidenciar efecto significativo.

Por otra parte en la Figura 12, se presenta el diagrama de interacción de AP – T, en ella se aprecia que la biopelícula elaborada con 50% de AP no varía la solubilidad con el incremento de la temperatura, mientras que con 70% de AP la solubilidad se incrementa con el aumento de la temperatura, por otra parte las biopelículas elaboradas a 50°C la

solubilidad disminuye con el incremento de AP, el mismo hecho sucede a 60°C aunque en menor cuantía, para el caso de la interacción P-T, se observó un comportamiento inverso, es decir la solubilidad se incrementa para las combinaciones P-T, esto se puede observar en la Figura 13.

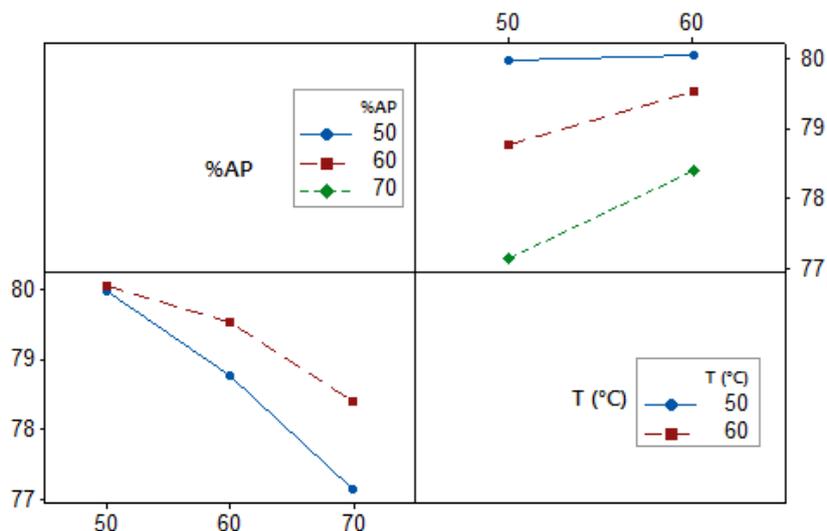


Figura 12: Diagrama de interacción AP-T para la solubilidad

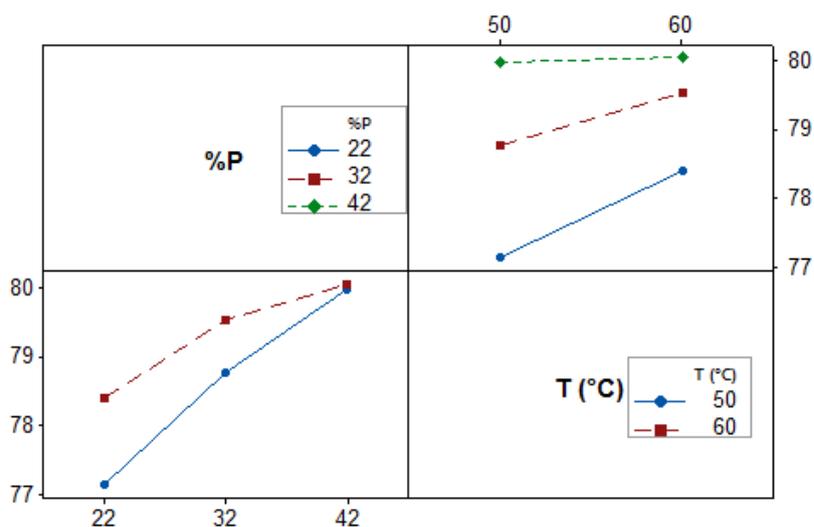


Figura 13: Diagrama de interacción P-T para la solubilidad

La solubilidad es una característica importante de las biopelículas, pues esta permite conocer a priori el comportamiento durante su uso en un alimento, en muchos casos conviene que esta tenga alta solubilidad cuando el alimento va a ser consumido directamente (Pérez y Krochta, 2001). Según los resultados obtenidos las biopelículas cumplen con esta característica, pudiendo concluir que son apropiadas para el uso en productos hortofrutícolas o productos mínimamente procesados.

La adición de mucilago aumenta la solubilidad en las biopelícula, Nazan y Sahbaz (2004) y Orozco (2017) mostraron un comportamiento contrario a lo encontrado puesto que usaron

directamente mucilago líquido, sin embargo se debe considerar que el mucilago tiene carácter altamente higroscópico, y que fácilmente forma geles (Morin 2010), sin embargo las biopelículas más densas y compactas presentan menor solubilidad (Sobral, 2000).

Orozcco (2017), reporta que las películas elaboradas con mucilago de nopal, presentan mejores propiedades mecánicas, en nuestros resultados todas las formulaciones presentaron buenas propiedades mecánicas, por lo que podemos decir que el mucilago de nopal gracias a sus propiedades tecnofuncionales ayuda a mejorar las propiedades mecánicas.

5.2. COLOR Y OPACIDAD DE LAS BIOPELÍCULAS

Los resultados del color de las biopelículas se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Color L* a* b* de las biopelículas

Trat	L*					a*					b*				
	\bar{x}	\pm	S	C.V. (%)	Dif. Sig. (**)	\bar{x}	\pm	s	C.V. (%)	Dif.Sig. (**)	\bar{x}	\pm	s	C.V. (%)	Dif.Sig. (**)
T1	66.71	\pm	0.24	0.37	A	1.20	\pm	0.07	6.60	A	0.70	\pm	0.07	10.00	B
T2	67.09	\pm	0.24	0.36	A	1.15	\pm	0.06	6.27	A	0.42	\pm	0.07	15.61	C
T3	65.74	\pm	0.26	0.39	B	1.12	\pm	0.05	5.05	A	0.35	\pm	0.05	12.76	C
T4	65.35	\pm	0.22	0.33	BC	0.98	\pm	0.01	1.38	B	0.92	\pm	0.02	1.65	A
T5	64.47	\pm	0.19	0.29	D	0.96	\pm	0.04	6.05	B	0.98	\pm	0.04	4.45	A
T6	64.84	\pm	0.11	0.17	C,D	0.92	\pm	0.03	4.22	B	0.59	\pm	0.02	3.51	B

Donde: \bar{X} , es la media; S, es la desviación estándar; C.V. es el coeficiente de variabilidad.

**Diferencia significativa de Tukey, evaluada al 5% de significancia (Anexo 04)

Se observó que la Luminosidad L* se encuentra alrededor de 65, lo que indica que tiende a blanco, así al realizar la prueba ANOVA para los tratamientos (Anexo 04) se observó que p-value = 0.00, lo que indica que existe diferencia significativa entre los tratamientos, de esta manera se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey observándose que los tratamientos T1 - T2, T3 - T4 Y T5 - T6 son similares, este mismo hecho se puede observar en la Figura 14.

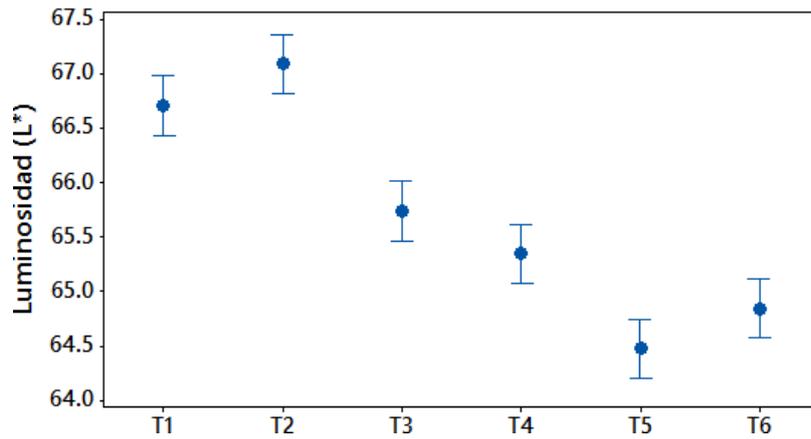


Figura 14: Diagrama de medias de la Luminosidad L*

En cuanto al croma a^* cuyos valores se muestran en la Tabla 7, se observó que este se encuentra con ligera tendencia al rojo, siendo el tratamiento T1 el que presenta mayor valor 1.20 ± 0.07 , mientras que T6 presento un valor de 0.92 ± 0.03 , con coeficientes de variabilidad alrededor de 5%, aunque los valores son muy bajos, no obstante estas presentan diferencia significativa ($p\text{-value} = 0.00$) (Anexo 04), agrupándose en dos grupos conformados por T1, T2, T3 y T4, T5, T6 evaluados a través del test Tukey , tal como se puede apreciar en la Figura 15.

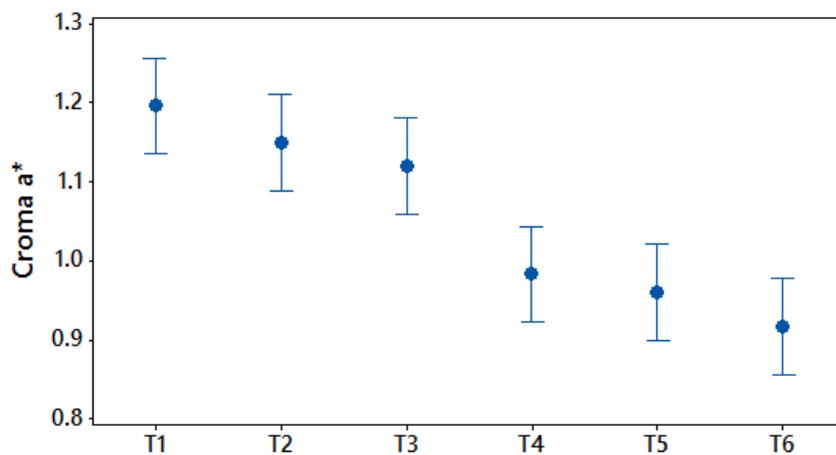
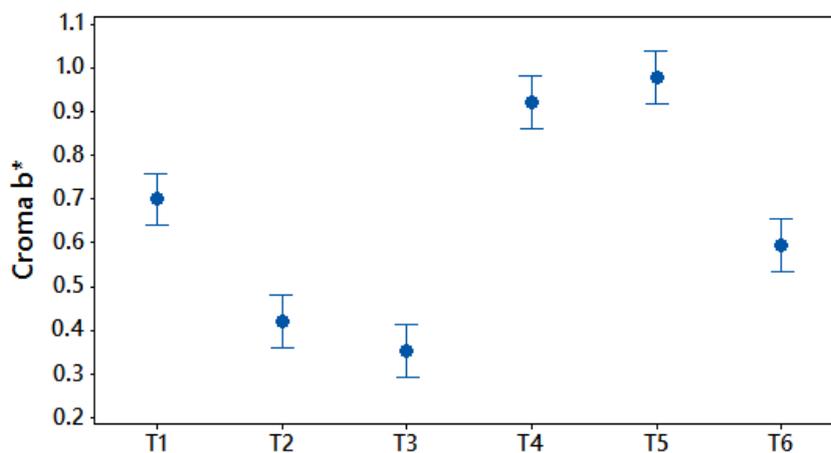


Figura 15: Diagrama de medias del croma a^*

Por otra parte los valores del croma b^* (Tabla 7) indican que tienden al amarillo aunque estos valores son bajos, siendo para T1 0.70 ± 0.07 y para T3 0.35 ± 0.05 , así al realizar la prueba de ANOVA se observó que los tratamientos presentan diferencia significativa, es decir $p\text{-value} < 0.05$ (Anexo 04), por lo que al analizar la comparación de medias de Tukey se observó que se agrupan en tres grupos similares estadísticamente tales como T5-T4, T1-T6, T2-T3, este mismo hecho puede evidenciarse en la Figura 16.

Figura 16: Diagrama de medias del croma b^*



Para indicar en qué dirección cambia la intensidad del amarillo con respecto a la luminosidad es frecuente usar parámetros como el índice de amarillez (YI) (Hirschler, 2012), que describe el cambio de color de una muestra de claro o blanco, a amarillo, y se utiliza con mayor frecuencia para evaluar los cambios de color en un material causado por la exposición al aire libre, siendo que a mayor valor de YI tiende a amarillo (Hirschler, 2012).

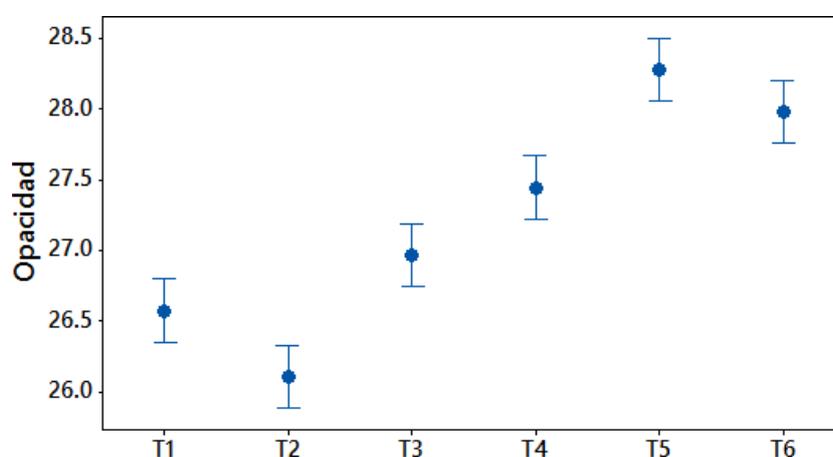
En la Tabla 8, se presenta los valores de la opacidad, de ella se desprende que T5 presenta mayor opacidad 28.28 ± 0.18 , mientras que T2 la menor 26.10 ± 0.08 , en todos los caso se presenta baja variabilidad menor al 1.52%, de esta manera al realizar el ANOVA se observó que presentan diferencia significativa, es decir $p\text{-value} < 0.05$ (Anexo 04), por lo que al realizar la prueba de comparación de medias de Tukey se observó que T5 y T6 presentan similares valores de opacidad, así como T4 y T3, esto mismo hecho se puede apreciar en la Figura 17.

Tabla 8: Coloración de las biopelículas

Trat	Opacidad				YI				WI						
	\bar{x}	\pm	S	C.V. (%)	Dif. Sig. (**)	\bar{x}	\pm	S	C.V. (%)	Dif.Sig. (**)	\bar{x}	\pm	s	C.V. (%)	Dif.Sig. (**)
T1	26.57	\pm	0.40	1.52	C,D	1.57	\pm	0.03	1.88	C	64.51	\pm	0.2183	0.34	B
T2	26.10	\pm	0.08	0.31	D	0.92	\pm	0.03	3.42	E	65.86	\pm	0.0379	0.06	A
T3	26.96	\pm	0.04	0.16	B,C	0.83	\pm	0.03	3.92	E	64.71	\pm	0.0416	0.06	B
T4	27.45	\pm	0.23	0.85	B	2.02	\pm	0.04	1.86	B	62.58	\pm	0.245	0.39	D
T5	28.28	\pm	0.18	0.65	A	2.17	\pm	0.09	4.17	A	61.53	\pm	0.0721	0.12	E
T6	27.99	\pm	0.11	0.41	A	1.31	\pm	0.05	3.63	D	63.06	\pm	0.1609	0.26	C

Donde: \bar{X} , es la media; S, es la desviación estándar; C.V. es el coeficiente de variabilidad.

**Diferencia significativa de Tukey, evaluada al 5% de significancia (Anexo 05)

**Figura 17:** Diagrama de medias para la opacidad

Por otra parte las biopelículas presentan bajo índice de amarillo (YI), estando alrededor de 0.83 a 2.17 con coeficientes de variabilidad menores al 3.92%, siendo T5 quien presentó mayor valor, mientras que T2 reporto el valor más bajo (Tabla 8), y al realizar el ANOVA se observó que los tratamientos presentan diferencia significativa $p\text{-value} = 0.00$ (Anexo 05), seguidamente al evaluar las diferencias de medias a través del test Tukey se apreció que el par T2 - T3 y T4 - T5 son similares, en tanto que los demás tratamientos son diferentes entre sí, este hecho también se puede apreciar en la Figura 18.

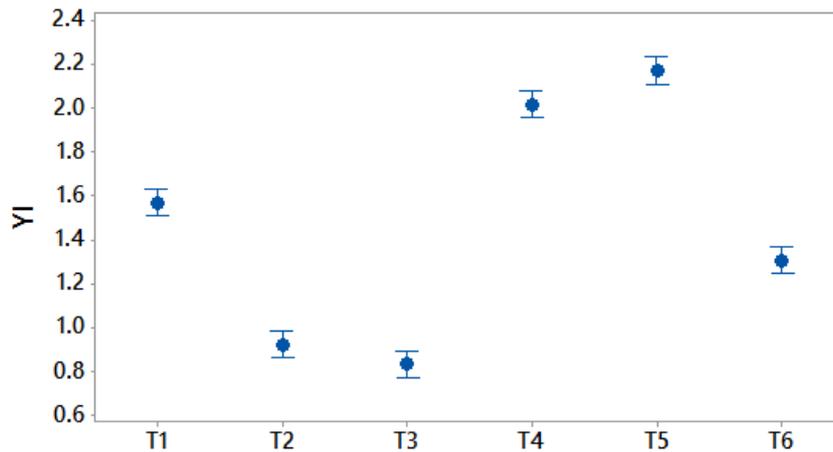


Figura 18: Diagrama de medias para el índice de amarillo

Asimismo se calculó el Índice de Blancura (WI) para las biopelículas, cuyos resultados se muestran en la Tabla 8, de ella se desprende que el tratamiento T2 presentó mayor índice de blancura 65.86 ± 0.0379 además de presentar baja variabilidad (0.06%), mientras que T5 presentó el menor valor (61.53 ± 0.0721 , y CV del 0.12%), indicando que los tratamientos presentan diferencia significativa ($p\text{-value} = 0.00$), así al realizar la prueba de comparación de medias se observó que estas presentan diferencia significativa (Anexo 05), siendo que únicamente WI de T1 y T3 son similares, tal como se puede apreciar en la Figura 19.

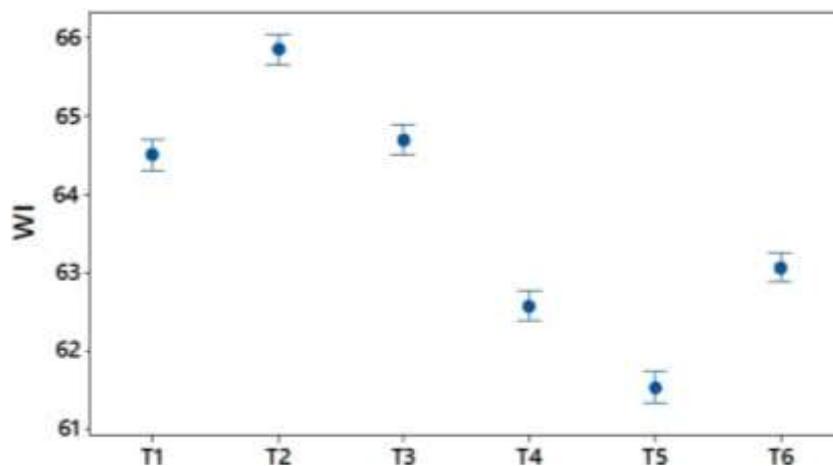


Figura 19: Diagrama de medias para el índice de blancura

Por otra parte en la evaluación de la interacción de %AP-T y %P-T, se observó que estas no son significativas ($p\text{-value} > 0.05$) para la opacidad, índice de amarillos e índice de blancura tal como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9: p-value para efectos e interacción de la coloración

Efecto	p-value		
	Opacidad	Índice de amarillez	Índice de blancura
%AP	0.994	0.997	0.998
%P	0.994	0.997	0.998
T	0.000	0.004	0.000
%AP*T	0.803	0.991	0.948
%P*T	0.803	0.991	0.948

En la Figura 20, se presentan los efectos del almidón de papa (AP), Pectina (P) y temperatura, de ella se desprende que a incrementos de %AP y %P la opacidad, el índice de amarillos e índice de blancura no se ven afectados este hecho se ratifica puesto que el $p\text{-value} > 0.05$ (Tabla 9), no obstante el incremento de temperatura presenta efecto significativo ($p\text{-value} < 0.05$) haciendo que la opacidad e índice de amarillos aumente, mientras que el índice de blancura disminuye drásticamente.

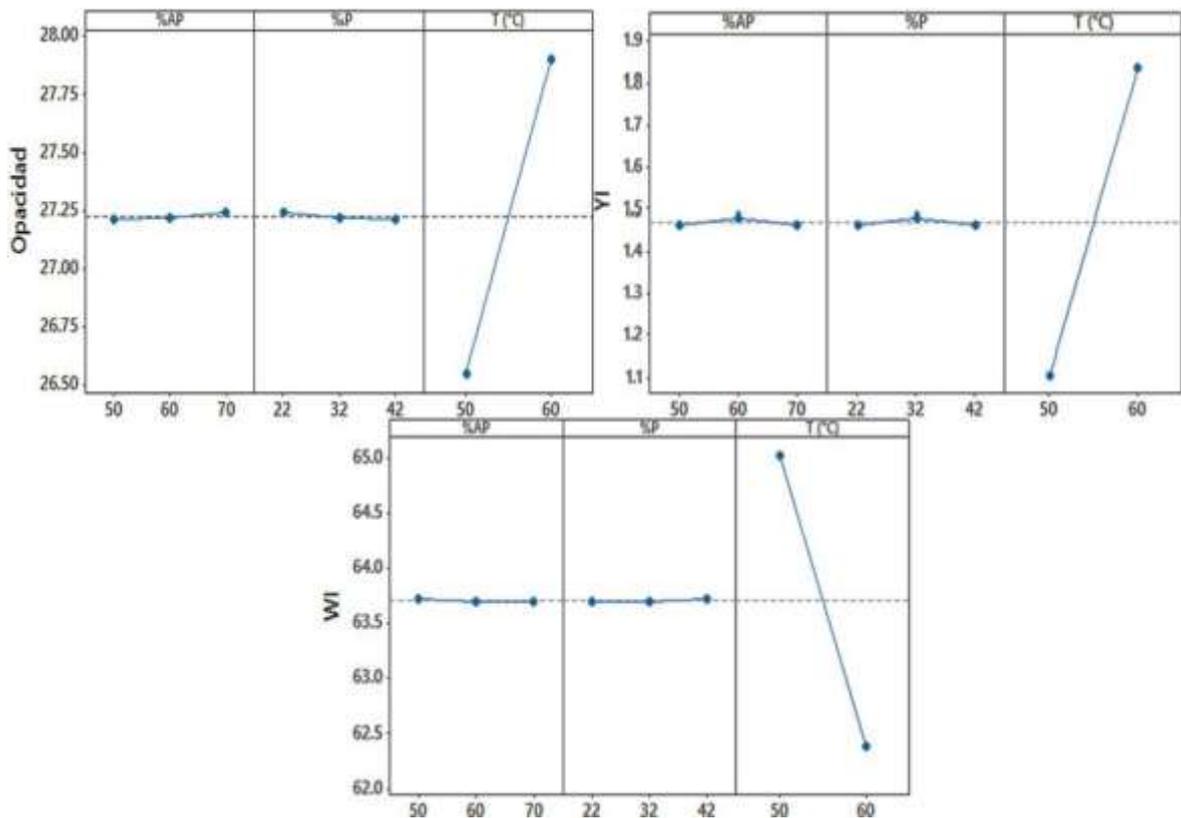


Figura 20: Diagrama efectos para opacidad, índice de amarillos e índice de blancura

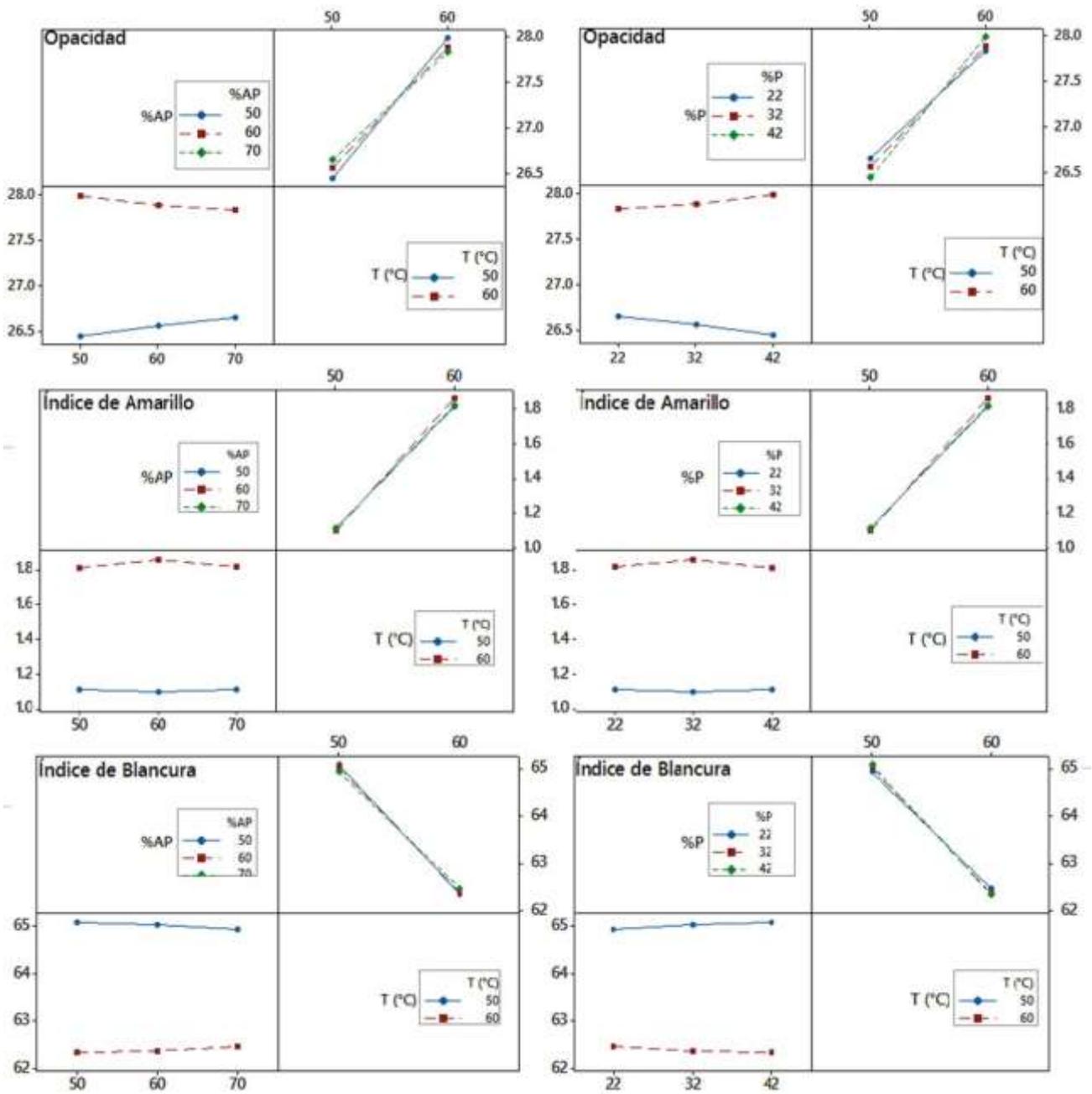


Figura 21: Diagrama de interacción para opacidad, índice de amarillos e índice de blancura

Este hecho se puede observar en la Figura 21, donde se aprecia que para cambios de temperatura, la coloración varía en la misma intensidad para los tres niveles de %AP y %P, mientras que para variaciones de %AP y %P a las temperaturas de estudio esta se mantiene casi constante

5.3. RESISTENCIA A DISOLVENTES DE LAS BIOPELÍCULAS

En la Tabla 10, se presenta los resultados de la resistencia a la solubilidad, de ella se desprende que a bajos niveles de almidón (T1 y T4) la solubilidad se encuentra entre Alta (AS) y mediana (MS) para los solventes Ácido Clorhídrico (0.1 M), Ácido Acético (0.1 M) Hidróxido de Sodio (0.1M), es decir que a incrementos de %AP la solubilidad disminuye en los solventes enconados, por otra parte en el solvente apolar como el Éter las biopelículas son insolubles (I), del mismo modo sucede cuando se utiliza el Alcohol etílico.

Por otra parte las biopelículas formuladas a 60°C (T4, T5 Y T6), presentan un carácter más resistivo a la solubilidad de solventes polares o iónicas tales como Ácido Clorhídrico (0.1 M), Ácido Acético (0.1 M), Hidróxido de Sodio (0.1M) y agua, aunque la temperatura de secado no influye considerablemente en la resistencia a los solventes como Éter y Alcohol etílico, estos resultados se pueden observar en el Anexo 06.

Tabla 10: Resistencia a disolventes

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Ácido Clorhídrico (0.1 M)	AS	AS	BS	MS	MS	BS
Ácido Acético (0.1 M)	AS	AS	BS	MS	MS	BS
Hidróxido de Sodio (0.1M)	MS	AS	MS	BS	AS	MS
Alcohol Etilico	I	I	I	I	I	I
Éter	I	I	I	I	I	I
Agua destilada	MS	AS	BS	AS	MS	BS

Donde: AS, alta solubilidad; Mediana solubilidad; BS, baja solubilidad; I, Insoluble

Sin embargo Oropeza et al. (2016) y dos Reis et al. (2014) mostraron que a mayores niveles de almidón se aumentó la solubilidad en biopelículas, este hecho no sucedió para las biopelículas formulados, este hecho se puede deber a la presencia de Mucilago de nopal, aunque en los estudios mencionados se presentaron niveles de plastificante (glicerina).

5.4. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS BIOPELÍCULAS

Para la evaluación de las características mecánicas, se acondiciono tiras de 7 cm x 1 cm de las biopelículas formuladas, de las cuales se midió el espesor cuyos resultados se presentan en la Tabla 11, en ella se aprecia que los valores oscilan entre 0.176 a 0.208 mm con variabilidades menores a 7.23%.

Por otra parte en la Figura 22, se presenta la resistencia a la ruptura (esfuerzo) de las biopelículas, se observa que las biopelículas presentan diferentes comportamientos de

resistencia a medida que se aplica mayor esfuerzo, siendo los tratamientos T4 y T2 los que soportan esfuerzos mayores a menores tiempos, esto se traduciría que estas dos biopelículas son menos elásticas, mientras que T5 es el que presenta mediana elasticidad aunque mayor resistencia al esfuerzo, seguido de T6, por otra parte los tratamientos T3 y T1 son los que presentaron mejor comportamiento de elasticidad durante el tiempo de aplicación de esfuerzo.

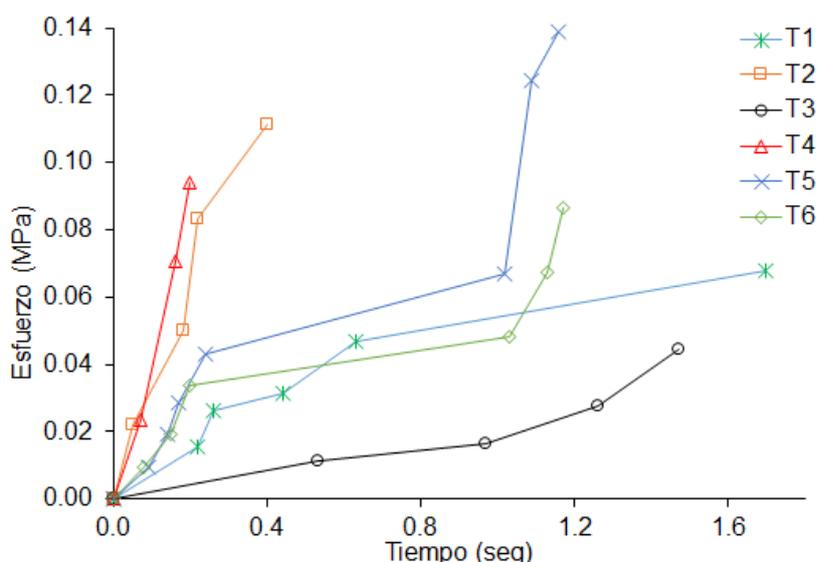


Figura 22: Variación del esfuerzo de las biopelículas

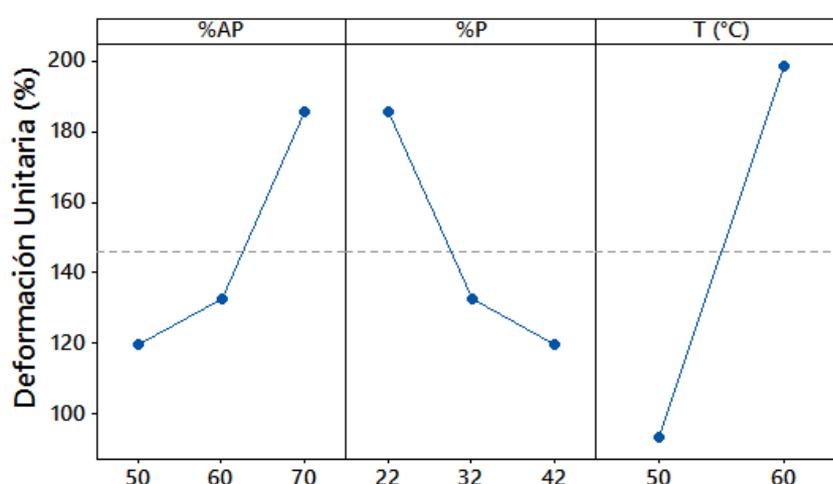
Por otra parte en la Tabla 11, se presenta la deformación unitaria de los tratamientos, se observa que a mayor contenido de almidón de papa (AP) se incrementa la deformación, y esta es mayor para las biopelículas elaboradas a 60°C alcanzando deformación de 246.15% para el tratamiento T6 (70% AP y 22 %P), no obstante el glicerol es el responsable de este comportamiento, de esta manera se considera que en todos los sistemas estudiados al aumentar la concentración de glicerol aumenta la elongación de las películas en detrimento de la tensión máxima a la rotura y el modulo elástico (Echevarria, 2012), y esto puede atribuirse al mayor poder plastificante de este compuesto de menor peso molecular y con mayor capacidad de retener agua en la matriz (Dias *et al.*, 2010).

La evaluación de los efectos generados, se presenta en la Figura 21, de ella se desprende que para el incremento de %AP y %P se observó que la elongación como deformación porcentual aumenta en aproximadamente 60%, aunque estos incrementos no difieren significativamente ($p\text{-value} > 0.05$) (Tabla 12), en tanto que el efecto de la temperatura es significativa ($p\text{-value} < 0.05$), aumentado en mayor cuantía la deformación de las biopelículas, tal como se evidencia en la Figura 23.

Tabla 11: Deformación y esfuerzo máximo de las biopelículas

Tratamiento	Espesor				Deformación Unitaria (%)	Esfuerzo Máximo (MPa)
	\bar{x}	\pm	s	C.V. (%)		
T1	0.188	\pm 0.003		1.84	60.00	0.07
T2	0.176	\pm 0.013		7.23	95.83	0.11
T3	0.189	\pm 0.011		5.62	125.00	0.04
T4	0.208	\pm 0.006		2.81	180.00	0.09
T5	0.205	\pm 0.009		4.16	169.23	0.14
T6	0.204	\pm 0.004		1.86	246.15	0.09

Los datos se presentan en el Anexo 07.

**Figura 23:** Efectos para la deformación unitaria**Tabla 12:** p-value para efectos de la deformación y esfuerzo máximo

Efecto	p-value	
	Deformación Unitaria	Esfuerzo Máximo
%AP	0.133	0.020
%P	0.133	0.020
T	0.022	0.024

Del mismo modo se determinó el esfuerzo máximo, observándose que las biopelículas elaboradas a 60°C presentan mayores valores hasta 0.14 MPa para el tratamiento T5, asimismo el tratamiento T3 presentó la menor valor del esfuerzo máximo aplicado siendo de 0.04 MPa, de esta manera también se pudo observar que el incremento de %AP y %P generan un efecto significativa negativo sobre el esfuerzo mecánico ($p\text{-value} < 0.05$) (Tabla 12), mientras que el incremento de la temperatura incide positivamente sobre el esfuerzo ($p\text{-value} < 0.05$), estos hechos también son observables en la Figura 24.

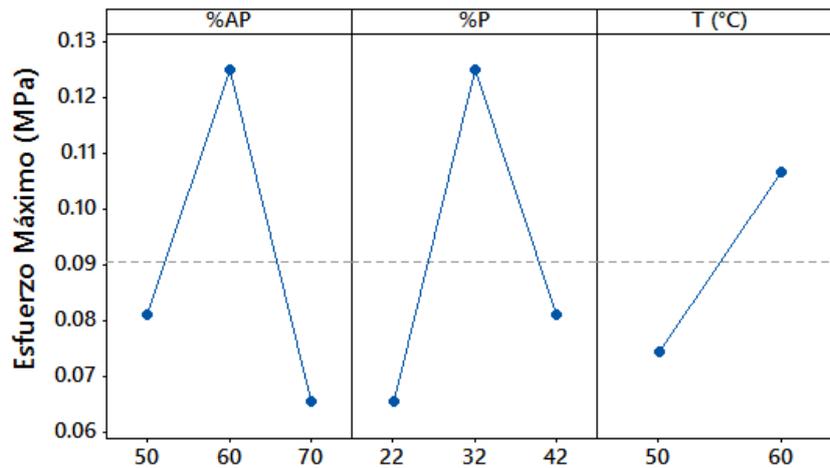


Figura 24: Efectos para el esfuerzo máximo

Este hecho podría estar relacionado con la adición de mucilago ya que el incremento de esta resulta en incrementos de la flexibilidad a las biopelículas, puesto que este polímero natural presenta cadenas poliméricas, y que al añadir el plastificante estas reducen las fuerzas intermoleculares e incrementan la movilidad de las cadenas poliméricas (Mali y Grossmann, 2003), por otra parte el mismo autor indica que las películas únicamente de almidón nativo con agua, presentan un comportamiento rígido pero quebradizo, es decir, tienen un alto esfuerzo de tensión a la fractura y un bajo valor de deformación; por esta razón, se recurre a la adición de los plastificantes como el glicerol.

Sánchez (2017), realizó la comparación de la calidad de bioplásticos obtenidos a partir de almidón de papa y camote, obteniendo como resultado que la fuerza de tracción es de 0.93 ± 0.14 newton, mientras que los resultados obtenidos en esta investigación oscilan entre 0.09 newton y 0.14 newton, esta variación de resultados se puede deber a la cantidad o tipo de insumos o a la temperatura de secado de las diferentes formulaciones. Por otro lado este mismo autor informa que la fuerza de elongación de bioplásticos obtenidos a partir de almidón de camote reportan una fuerza de elongación de $51,25 \pm 0.95$ %, en nuestros resultados el mayor valor obtenido en la medición de la fuerza de elongación fue la del tratamiento t3 con un valor de 48.57 %, no habiendo diferencia significativa entre estos valores.

CONCLUSIONES

En cuanto a la elaboración de las biopelículas estas presentaron buenas propiedades físicas y mecánicas, dándonos una buena opción para poder ser utilizadas posteriormente en productos para un consumo directo o mínimamente procesados.

En cuanto a las propiedades físicas de las biopelículas, la solubilidad es mayor con el incremento de pectina al 2% y la temperatura, por otra parte la opacidad y el índice de amarillo estas se incrementan con la temperatura, mientras que el índice de blancura disminuye, asimismo se observó que las biopelículas son más resistentes en medios apolares, mientras que en solventes polares disminuye la resistencia para las biopelículas elaboradas a menor temperatura.

Respecto a las propiedades mecánicas las biopelículas presentan mejor resistencia a la ruptura a mayor temperatura; y a incrementos de almidón de papa y pectina reportan menores valores, por otra parte la deformación unitaria es mayor cuando se adiciona almidón de papa e incrementos de temperatura.

RECOMENDACIONES

- Utilizar almidón de papas nativas con temperatura de gelatinización mayor a 70°C.
- Soportar las biopelículas en bases antiadherentes para someterlas a secado.
- Utilizar materiales de empaques biodegradables, de esta manera estaremos contribuyendo al cuidado ambiental.
- Comenzar a utilizar almidón de papa en diferentes procesos, debido a su bajo costo de producción.
- Utilizar polímeros naturales de la zona.

SUGERENCIAS

- Evaluar las propiedades mecánicas para diferentes concentraciones de mucilago de nopal.
- Formular biopelículas comestibles con almidones nativos de otros tubérculos y raíces.
- Aplicar las biopelículas como recubrimiento de alimentos.
- Estudiar la permeabilidad al vapor de agua de biopelículas comestibles.
- Aplicar las biopelículas en alimentos mínimamente procesados y estudiar los efectos en sus diferentes características.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraján, M. A. (2008). Efecto del metodo de extraccion en las características químicas y físicas del mucilago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) y estudio de sus aplicación como recubrimiento comestible. Tesis doctoral. Universidad Politecnica de Valencia, España.
- Allen, L., Nelson, A.I., Steinberg, M.P., McGill J.N. (1963). Edible corn carbohydrate food coatings. II. Evaluation on fresh meat products. *Food Technol.* 17:104-108.
- Arizmendi Coterio D. (2004). Optimización de dos compuestos plastificantes (glicerol y polietilenglicol) en la elaboración de una película plástica comestible obtenida a partir del mucílago de nopal de la especie *Opuntia tomentosa* Salm-Dyck. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de México.
- ASTM D6988-13, Guía estándar para la determinación del espesor de la película de plástico Probetas, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. www.astm.org
- ASTM D882-00, Método de prueba estándar para propiedades de tracción de láminas de plástico delgadas, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002. www.astm.org
- ASTM E96 / E96M-16, Métodos de prueba estándar para la transmisión de vapor de agua Materiales, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. www.astm.org
- Ávila, L. (2018). Efecto de la adición de ácido cítrico y proteína de lactosuero en la elaboración de películas basadas en almidón de *Canna indica* L. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. 106 p.
- Badui, S. (2006). *Química de los Alimentos*. Editorial PEARSON. México.
- Badui, S.D. (2001). *Química de los alimentos*. Ed. Pearson. México D. F., 94-104.
- Beynum, G.M.A., Roels, J.A. (1985). *Starch conversion technology*. Ed. Marcel Dekker. Nueva York, Estados Unidos. pp. 360.
- Biliaderis, C.G. (1991). The structure and interactions of starch with food constituents. *Can J Physiol Pharmacol.* 69:60-78.

- Blazek, J., Copeland, L. (2007). Pasting and swelling properties of wheat flour and starch in relation to amylose content. *Carbohydrate Polymers* 71:380-387.
- Cardenas, A.; Higuera-Ciapara, I.; Goycoolea, F.M. (1997). Rheology and Aggregation of Cactus (*Opuntia ficus-indica*) Mucilage in Solution. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 2:152-159.
- Chen, H. (1995). Functional properties and applications of edible films made of milk proteins. *Journal of Dairy Science*, Savoy, 78(11):2563–2583.
- Chojnacka, K. (2010). Biosorption and bioaccumulation - the prospects for practical applications. *Environ. Int.* 36(3):299-307.
- CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) (2004). *Colorimetry*, 3rd edn. Vienna: CIE Central Bureau, Publ. 15-2004.
- Cuizano, N., Llanos, B. & Navarro, A. (2009). Aplicaciones ambientales de la adsorción mediante biopolímeros naturales: Parte 1- Compuestos fenólicos. *Sociedad Química del Perú*. 75 (4), 488-494.
- Cuq, B. Gontard, N.; Guilbert, S. (1998). Proteins as agricultural polymers for packaging production. *Cereal Chemistry*, St. Paul, 75(1):1-9.
- Debet, R.M., Gidley, J.M. (2006). Three classes of starch granule swelling: Influence of surface proteins and lipids. *Carbohydrate Polymers* 64(3):452-465.
- Dias, A.B. Müller; C.M.O. Larotonda, F.D.S.; Laurindo, J.B. (2010). Biodegradable films based on rice starch and rice flour. *J. Agric. Food Chem.* 51(24): 7005-7011.
- Domenech, X. & Peral, J. (2008). *Química Ambiental de Sistemas Terrestres*. Editorial Reverté. Barcelona, España. 239 pp.
- Donhowe I. G., Fennema O. (1994). Edible films and coatings: characteristics, formation, definitions, and testing methods. In: Krochta JM, Baldwin EA, Nisperos-Carriedo NO editors. *Edible coatings and films to improve food quality*. Lancaster, Pa: Technomic Pub Co. pp 1-24.
- Donhowe I. G., Fennema O. (1994). Edible films and coatings: characteristics, formation, definitions, and testing methods. In: Krochta JM, Baldwin EA, Nisperos- Carriedo NO editors. *Edible coatings and films to improve food quality*. Lancaster, Pa: Technomic Pub Co. pp 1-24.

- Duxbury, D.D. (1989). Modified starch functionalities-no chemicals or enzymes. *Food Processing* 50:35–37.
- Echevarria, I. (2012). Materiales biodegradables en base a proteínas de soja y montmorillonitas. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina. p275
- Espino-Díaz, M., Ornelas-Paz, J., MartínezTéllez, M., Santillán, C., BarbosaCánovas, G., Zamudio-Flores, P., Olivas, G. (2010). Development and Characterization of Edible Films Based on Mucilage of *Opuntia ficusindica* (L.). *Journal of Food Science* 75 (6):347-352.
- Ferreras, R. (2009). Análisis reológicos de las diferentes fracciones de harina obtenidas en la molienda del grano de trigo (tesis de maestría). Universidad de Salamanca, España.
- Flory, P.J. (1953). *Principles of Polymer Chemistry*. Cornell University Press, Ithaca, New York
- Francis, F.J.; Clydesdale, F.M. (1975). Development of the CIE system. En: *Food colorimetry: theory and applications*. Editorial The Avi Publishing Company. Connecticut, EE.UU. p. 61-72.
- García, J. (2009). Estudio comparativo del efecto de la adición de almidón modificado en un pan tipo “muffin” horneado en microondas y convencionalmente (Tesis de maestría). Insituto Politécnico Nacional, México.
- Gontard, N., Guilbert, S., Cuq, J.L. (1993). Water and Glycerol as Plasticizer Affect Machinical and Water Vapor Barrier Properties of an Edible Wheat Gluten Film. *Journal of Food Science*. 58:206-211.
- Gontard, N., Guilbert, S.,Cuq, J.L. (1992). Edible wheat gluten film: influence of the main process variables on film properties using response surface methodology. *Journal of Food Science*, 57(1):190-199.
- Gontard, N., Guilbert, S.,Cuq, J.L. (1992). Edible wheat gluten film: influence of the main process variables on film properties using response surface methodology. *Journal of Food Science*, 57(1):190-199.
- Hirschler, R. (2012). Whiteness, yellowness, and browning in food colorimetry. En: *Color in*

Food: Technological and Psychophysical Aspects. Editorial J.L. Caivano & Buera M.P. EE.UU. Pp. 93-104.

Hoover, R. (2002). Efecto del tratamiento de calor, humedad en la estructura y las propiedades físico-químicas de los almidones de raíz. *Carbohidratos y polimeros*, 425-437.

Jarvis, M.C. Forsyth, W., Duncan, H.C. (1988). A survey of the pectin content of nonlignified of monocot cell walls. *Plant Physiol.* 88: 309-314.

Kester, J. J.; Fennema. O.R. (1986). Edible films and coatings: a review. *Food Technology*, Chicago, 40(12):47-59.

Krochta, J. M., Mulder-Johnston C. (1997). Edible and biodegradable polymer films: challenges and opportunities. *Food Technol.* 51: 61-77.

Krochta, J.; Baldwin, E y Nisperos-Carriedo, M. (1994). Edible coatings and films to improve food quality. Technomic Publishing Company, New York, p1344.

Kumar, P., Ramalingam, S., Sathyaselvabala, V., Kirupha, S., Murugesan, A., Sivanesan, S. (2012). Removal of Cd(II) from aqueous solution by agricultural waste cashew nut shell. *Korean J. Chemical. Engineering.* 29:756-768.

Lai L., Kokini. (1991). Physicochemical changes and rheological properties of starch during extrusion (A review). *Biotechnology Progress*, 7(3):251-266.

López-García, F. y Jiménez-Martínez, C. (2015). Películas biopoliméricas: aplicaciones para envases y otros productos. En *Tendencias de innovación en la ingeniería de alimentos*. Omnia Publisher SL., España, p. 9-36.

León-Martínez, F. M., Rodríguez-Ramírez, J., Medina-Torres, L. L., Méndez Lagunas, L. L., Bernad-Bernad, M. J. (2011). Effects of drying conditions on the rheological properties of reconstituted mucilage solutions (*Opuntia ficus-indica*). *Carbohyd. Polym.* 84(1):439–445.

Mali, S., Grossmann, M. V. E. (2003). Effects of yam starch films on storability and quality of fresh Strawberries (*Fragaria ananassa*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, 7055-7011.

- Mali, S., L. S. Sakanaka, F. Yamashita, M. V. E. Grossmann. (2005). Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect. *Carbohydr. Polym.* 60:283-289
- Martínez, H.E. (1997). Estudios bioquímicos y nutricionales en tortilla de maíz elaboradas por un proceso de extrusión. Tesis Doctoral. Centro de investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN). Departamento de biotecnología y Bioingeniería. México, DF. México.
- Martin-Polo, M.; Voilley, A ; Blond, G.; Colas, B.; Mesnier, M.; Floquet, N. (1992). Hydrophobic Films and their efficiency against moisture transfer. 2. Influence of the physical state. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, 40(3):413-418.
- Mc Garvie D, Parolis H. (1981). Methylation analysis of the mucilage of *Opuntia ficus indica*. *Carbohydrate Research* 88:305-314.
- McHugh, T. H.; Krochta, J. M. (1994). Sorbitol vs. Glycerol-Plasticized Whey Protein Edible Films: Integrated Oxygen Permeability and Tensile Property Evaluation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 42:841-845.
- Medina-Torres, L., Brito-De La Fuente E., Torrestiana- Sánchez, B., Katthain, R. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocol.* 14:417-424.
- Melian, D. E. (2010). Extracción de almidón de papa usando muestras de diez variedades nativas de Chiloé y dos variedades comerciales. Tesis de pregrado. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Mendoza, R.; Velilla, W. (2011). Metodología para la caracterización termo-mecánica de películas plásticas biodegradables. *Rev. Prospect.* 9(1): 46-51.
- Meneses, J.; Corrales, C.M.; Valencia, M. (2007). Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. *Revista EIA*, 8: 57-67.
- Moorthy, S. (2002). Propiedades físico-químicas y funcionales de los almidones de tubérculos tropicales. *El almidón*, 559-592.

- Morin C.S. (2010). Elaboración y caracterización de películas comestibles a base de almidón de maíz ceroso y mucílago de nopal (*Opuntia ficus*) usando la tecnología de extrusión termoplástica. Tesis de maestría, Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, México. pp 97.
- Morin, C. S. (2010). Elaboración y caracterización de películas comestibles a base de almidón de maíz ceroso y mucílago de nopal (*Opuntia ficus*) usando la tecnología de extrusión termoplástica. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. México.
- Naranjo, G. y Pazmiño, S. (2010). Plan de comercio exterior y negocios internacionales para la exportación del almidón de yuca a Bogotá (tesis de grado). Escuela Politécnica del Ejército, Colombia.
- Navarro, A. E., Manrique, A., Iparraguirre, E., Díaz, C., Jacinto, C., Cuizano, N & Llanos, B. (2010). Síntesis y caracterización de quitosano cuternario nativo y reticulación en polvo para su aplicación en la adsorción de aniones metálicos. *Sociedad Química del Perú*. 76 (4), 313-321.
- Nazan, K.T., Sahbaz, F. (2004) Water vapor permeability, tensile properties and solubility of methylcellulose-based edible films. *Journal of Food Engineering*, 61:459- 466.
- Núñez, M.C., Bello, L.A., Tecante, A. (2004). Swelling-solubility characteristics, granule size distribution and rheological of banana (*Musa paradisiaca*) starch. *Carbohydrate Polymers*. 56:65-75.
- Ordorica, C.A. (1988). Obtención de los aislados proteínicos por micelización y precipitación isoeléctrica a partir de pastas de cártamo. Tesis de Doctorado. CINVESTAV-Irapuato, México.
- Oropeza, R.A., Montes A.I., Padrón, C.A. (2016). Películas biodegradables a base de almidón: propiedades mecánicas, funcionales y biodegradación. *Rev. Venez. Cienc. Tecnol. Aliment.* 7(1):065-093.
- 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. Tesis de grado, Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Ortega-Toro, R., Jiménez, A., Talens, P., Chiralt, A. (2014). Films de almidón termoplástico.

Influencia de la incorporación de hidroxipropil-metil-celulosa y ácido cítrico. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(2): 134-141.

Pagan, J. (199). Degradación enzimática y características físicas y químicas de la pectina del bagazo de melocotón. Tesis doctoral, Universitat de Lleida, España. 142 p.

Pérez-Gago, M. B., and J. M. Krochta. 2001. Denaturation time and temperature effects on solubility, tensile properties, and oxygen permeability of whey protein edible films. *J. Food Sci.* 66: 705-710.

Pomeranz, Y. (1991). *Functional properties of food components*. 2da Edic. Academic Press. EEUU pp. 24-78.

Pretsch E., Bühlmann P., Affolder C. (2000). *Structure Determination of Organic Compounds. Tables of spectral data*. 3rd ed. Berlín: Springer. 421p.

Ramirez, J. C., Gomez, B. E., Veloz, R. A., Herrera, I. E., Mejía, L., Zavala, A. & Ramos, D. B. (s.f). *Absorción ultravioleta, visible e infrarroja cercana de un mucílago*. Universidad de Guanajuato.

Rooney, L.W., Huang D.P. (2001). Starches for snack foods. In: Lusas EW y Rooney LW editors. *Snack foods processing*. Pennsylvania: Technomic Publishing Company 115-130.

Ruíz, F., Guerrero, B. J. A. (2009). *Aplicación de películas comestibles a base de quitosano y mucílago de nopal en fresa (Fragaria ananassa) almacenada en refrigeración (Tesis de maestría)*. Universidad de las Américas Puebla, Puebla, México.

Ruíz, G. (2006). *Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. *Rev. Ingeniería y Ciencia*, 2(4): 5-28.

Sáenz, C., Berger, H., Corrales García, J., Galletti, L., García de Cortázar, V., Higuera, I., Mondragón, C., Rodríguez-Félix, A., Sepúlveda, E. Varnero, M.T. (2006). *Utilización agroindustrial del nopal*. *Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO* N° 162. Roma.

Sáenz, C., García, N., Abraján, M., Fabry, A.M., Robert, P. (2016). El nopal, una especie de zonas áridas productora de hidrocoloides naturales. *La Alimentación Latinoamericana* 322:60-68.

- Sáenz, C., Tapia, S., Chavez, J., Robert, P. (2009). Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chem.* 114:616–622.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E., Matsuhiro B. (2004). *Opuntia* spp mucilage's: a functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environment* 57:275–290.
- Sanchez, K. (2017). Comparación de la calidad de bioplásticos obtenidos del almidón de los residuos de papa y camote de restaurantes del mercado central del distrito de independencia (Tesis de grado). Universidad Cesar Vallejo, Lima , Perú.
- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Singh, N., & Singh, B. (2003). Morfología, propiedades térmicas y reológicas de los almidones de diferentes fuentes botánicas. *Química de los alimentos.*, 219-231.
- Sobral PJA (2000) Inf luência da espessura de biofilmes feitos à base de proteínas miofibrilares sobre suas propriedades funcionais. *Pesq. Agropec. Brás.* 35: 1-14.
- Soriano, J. (1986). Obtención y caracterización de almidón pre gelatinizado a partir de almidón de yuca (tesis de grado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.
- Tester, R.F., Debon, S.J.J. (2000). Annealing of starch-a review. *Biological Macromol.* 27:1-12.
- Tharanathan, R. 2003. Biodegradable films and composite coatings: past, present and future. *Critical Review in Food Science and Technology* 14:71-78
- Torre, G.L., Chel, G.L., Betancur, A.D. (2008). Functional properties of square banana (*Musa balbisiana*) starch. *Food Chemistry* 106:1138–1144.
- Tsezos, M. (2001). Biosorption of metals. The experience accumulated and the outlook for technology development. *Hydrometallurgy* 59:241-243.
- Valero, M. F., Ortegón, Y., Uscategui, Y. (2013). Biopolímeros: Avances y perspectivas. *DYNA.* 80(181): 171-180.
- Varela, A. (1997). Propiedades químicas y físicas de polímeros. Universidad Coruña. Editorial Universidade da Coruña, Coruña, España. 95 p.
- Vargas, L., Gamiño, Z., Fuentes, R., Contreras, D. (2018). Mucilago de nopal y su aplicación en la obtención de biopolímeros. *Naturaleza y Tecnología* 5(1):25-35.

- Wang, S., Jinglin. Y., Jiugao. Y., Haixia, C., Jiping. P., & Hongyan. L. (2007). Partial characterization of starches from Dioscorea opposita. *Journal of Food Engineering* 11:01-07.
- Whistler, R.L.; Bemiller, J.N.; Paschall, E.F. (1984). *Starch: Chemistry and Technology*. 2 ed. Orlando, Florida, Estados Unidos de América. Academic Press. 718 pp.
- Yang, L., Paulson, A. T. (2000). Mechanical and water vapour barrier properties of edible gellan films. *Food Research International*, 33:563- 570.
- Zamora R. (2011). *Elaboración de un alimento funcional a base de Saccharomyces boulardii e inulina*. Tesis de maestro. Facultad de Químico-farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- Zamudio-Flores, P. B., A. Vargas-Torres, J. Pérez-González, E. Bozquez-Molina, and L. A. Bello-Pérez. (2006). Films prepared with oxidized banana starch: mechanical and barrier properties. *Starch/Stärke* 58:274-282.
- Zazueta, J.J. (2003). *Extrusión de maíz (Zea mays L.) azul: efecto del hidróxido de calcio sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales*. Tesis de doctorado. Programa de postgrado en alimentos del centro de la república. Facultad de Química. Universidad Autónoma de Querétaro. UAQ. Santiago de Qro. Querétaro. México.
- Zazueta, J.J., Martínez, F., Jacobo, N., Ordorica, C. y Paredes, O. (2001). Effect of the addition of calcium hydroxide on characteristics of extruded products from blue maize (Zea mays L.) using response surface methodology. *J. Sci. Food. Agric.* 81:1379-1386.

ANEXOS

ANEXO 01: Datos de la prueba de solubilidad de las biopelículas

		R1	R2	R3			R1	R2	R3	
T1	Peso del vaso	56.4518	55.4527	59.6768	T1	peso de la muestra seca con vaso	56.5109	55.5277	59.8027	
	Peso con Muestra	56.7609	55.8191	60.2937		PESO FINAL	0.0591	0.075	0.1259	
	PESO INICIAL	0.3091	0.3664	0.6169		T2	peso de la muestra seca con vaso	52.2071	53.9016	59.3992
	Volumen de agua (ml)	31	37	62			PESO FINAL	0.0866	0.0837	0.08
T2	Peso del vaso	52.1205	53.8179	59.3192	T3	peso de la muestra seca con vaso	54.8601	52.9113	55.1677	
	Peso con Muestra	52.5215	54.2015	59.7138		PESO FINAL	0.084	0.0893	0.1084	
	PESO INICIAL	0.401	0.3836	0.3946		T4	peso de la muestra seca con vaso	53.9065	56.4413	53.6793
	Volumen de agua (ml)	40	38	39			PESO FINAL	0.0962	0.0699	0.088
T3	Peso del vaso	54.7761	52.822	55.0593	T5	peso de la muestra seca con vaso	55.413	53.6146	52.3764	
	Peso con Muestra	55.1294	53.2152	55.55		PESO FINAL	0.0707	0.128	0.1129	
	PESO INICIAL	0.3533	0.3932	0.4907		T6	peso de la muestra seca con vaso	50.9344	52.7343	53.1371
	Volumen de agua (ml)	35	39	49			PESO FINAL	0.1006	0.0843	0.0693
T4	Peso del vaso	53.8103	56.3714	53.5913	Biopelícula disuelta					
	Peso con Muestra	54.3035	56.7108	54.0378	Trat	R1	R2	R3		
	PESO INICIAL	0.4932	0.3394	0.4465	T1	0.2500	0.2914	0.4910		
	Volumen de agua (ml)	49	34	45	T2	0.3144	0.2999	0.3146		
T5	Peso del vaso	55.3423	53.4866	52.2635	T3	0.2693	0.3039	0.3823		
	Peso con Muestra	55.7019	54.1153	52.7915	T4	0.397	0.2695	0.3585		
	PESO INICIAL	0.3596	0.6287	0.528	T5	0.2889	0.5007	0.4151		
	Volumen de agua (ml)	36	63	53	T6	0.3675	0.2964	0.2583		
T6	Peso del vaso	50.8338	52.65	53.0678						
	Peso con Muestra	51.3019	53.0307	53.3954						
	PESO INICIAL	0.4681	0.3807	0.3276						
	Volumen de agua (ml)	47	38	33						

ANEXO 02: Datos del análisis estadístico para la solubilidad

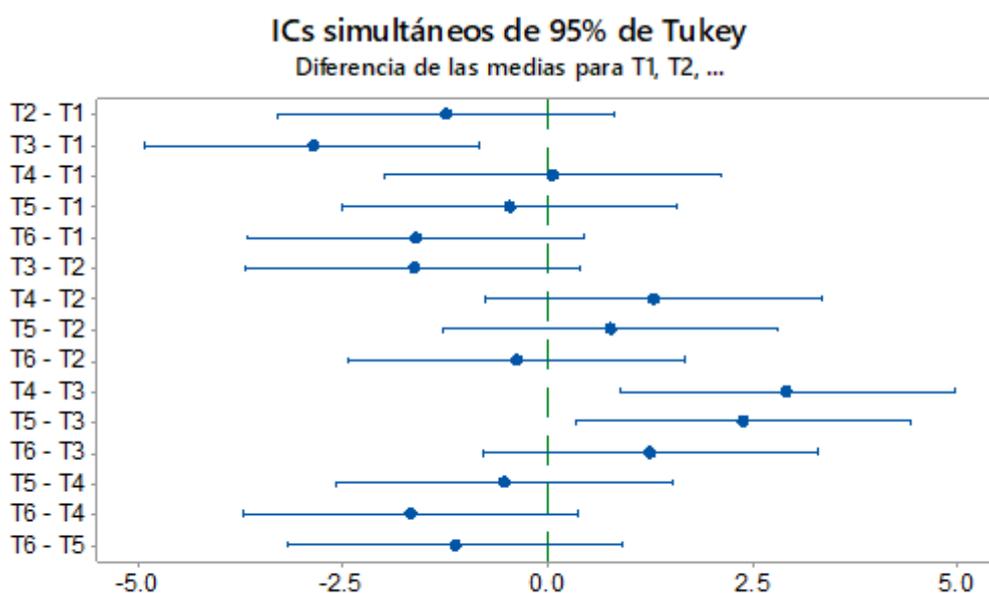
PRUEBA TUKEY PARA LA SOLUBILIDAD POR TRATAMIENTO

ANOVA para Tratamientos

Fuente	GL	SC Ajust	MC Ajust.	Fcal	p-value
Factor	5	18.839	3.7679	6.76	0.003
Error	12	6.688	0.5573		
Total	17	25.527			

Comparación múltiple Tukey

Factor	N	Media	Agrupación
T4	3	80.064	A
T1	3	80.001	A
T5	3	79.532	A
T2	3	78.77	AB
T6	3	78.404	AB
T3	3	77.141	B



Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

ANOVA DE FACTORES PARA LA SOLUBILIDAD

Fuente	GL	SC Ajust	MC Ajust.	Fcal	p-value
%AP	2	15.569	7.7843	13.97	0.001
%P	2	15.569	7.7843	13.97	0.001
T	1	2.18	2.1803	3.91	0.071
%AP*T	2	1.09	0.5451	0.98	0.404
%M*T	2	1.09	0.5451	0.98	0.404

ANEXO 03: Datos del análisis estadístico para el color

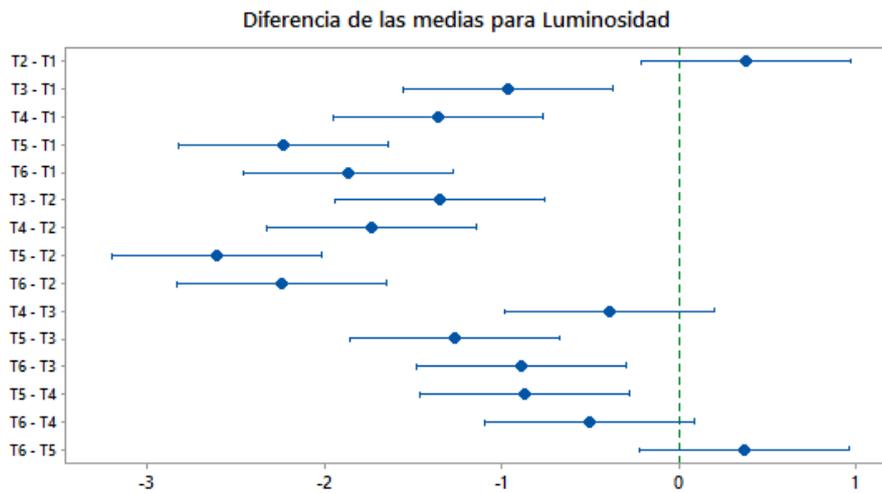
FONDO NEGRO					FONDO BLANCO				
	Replica	L*	a*	b*		Replica	L*	a*	b*
T1	R1	23.92	-0.04	-2.33	T1	R1	90.81	1.24	-1.6
	R2	24.08	-0.05	-2.32		R2	90.88	1.11	-1.57
	R3	24.42	-0.06	-2.28		R3	90.85	1.09	-1.56
T2	R1	23.69	-0.14	-2.01	T2	R1	90.87	1.07	-1.58
	R2	23.81	-0.07	-1.99		R2	90.89	1.08	-1.57
	R3	23.68	-0.08	-2.01		R3	90.91	1.01	-1.56
T3	R1	24.28	-0.06	-2.14	T3	R1	90.2	1.02	-1.74
	R2	24.32	-0.13	-2.13		R2	90.17	1.04	-1.76
	R3	24.34	-0.13	-2.15		R3	90.14	0.98	-1.77
T4	R1	24.91	-0.08	-1.93	T4	R1	90.06	0.91	-0.99
	R2	24.75	-0.08	-1.92		R2	90.06	0.91	-1.01
	R3	24.5	-0.06	-1.94		R3	90.08	0.91	-1.02
T5	R1	25.54	-0.14	-1.87	T5	R1	89.87	0.85	-0.91
	R2	25.24	-0.11	-1.92		R2	89.92	0.87	-0.89
	R3	25.48	-0.11	-1.84		R3	89.88	0.8	-0.89
T6	R1	25.11	-0.11	-1.95	T6	R1	90.06	0.84	-1.38
	R2	25.31	-0.09	-1.99		R2	90.04	0.82	-1.39
	R3	25.18	-0.09	-1.99		R3	90.02	0.8	-1.38

ANOVA PARA L* POR TRATAMIENTOS

Fuente	GL	SC Ajust	MC Ajust.	Fcal	p-value
Factor	5	15.945	3.189	68.400	0.000
Error	12	0.560	0.047		
Total	17	16.504			

Comparación múltiple Tukey

Factor	N	Media	Agrupación
T2	3	67.087	A
T1	3	66.707	A
T3	3	65.737	B
T4	3	65.347	B,C
T6	3	64.840	C,D
T5	3	64.470	D



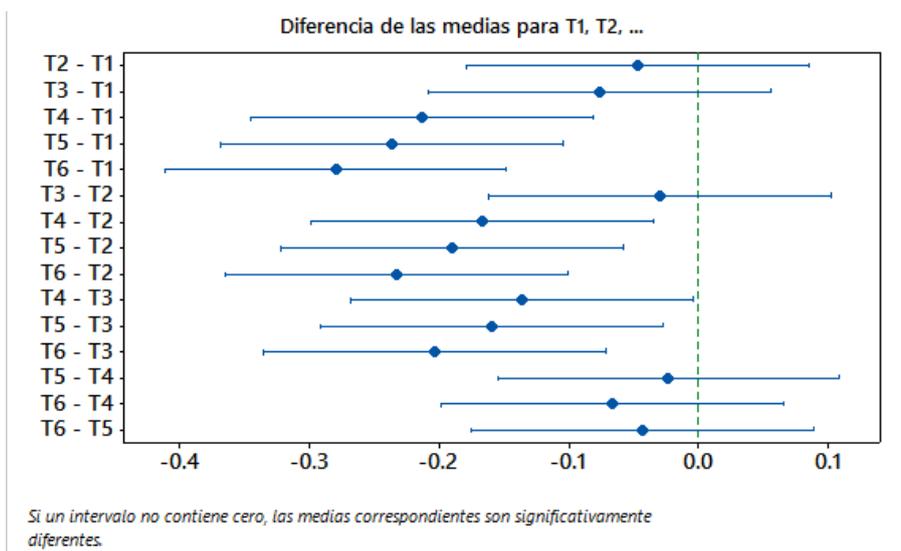
Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

ANOVA PARA α * POR TRATAMIENTOS

Fuente	GL	SC Ajust	MC Ajust.	Fcal	p-value
Factor	5	0.200	0.040	17.250	0.000
Error	12	0.028	0.002		
Total	17	0.228			

Comparación múltiple Tukey

Factor	N	Media	Agrupación
T1	3	1.197	A
T2	3	1.150	A
T3	3	1.120	A
T4	3	0.983	B
T5	3	0.960	B
T6	3	0.917	B

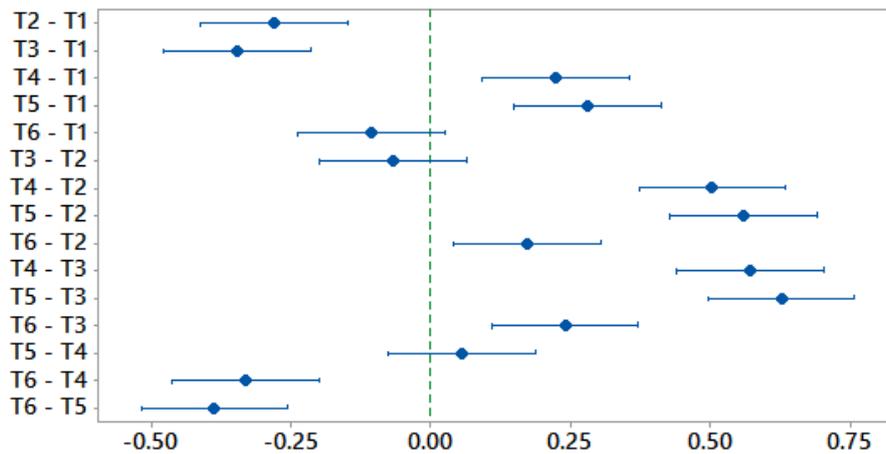


ANOVA PARA b^* POR TRATAMIENTOS

Fuente	GL	SC Ajust	MC Ajust.	Fcal	p-value
Factor	5	0.988	0.198	85.930	0.000
Error	12	0.028	0.002		
Total	17	1.016			

Comparación múltiple Tukey

Factor	N	Media	Agrupación
T5	3	0.980	A
T4	3	0.923	A
T1	3	0.700	B
T6	3	0.593	B
T2	3	0.420	C
T3	3	0.353	C



Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

ANEXO 04: Datos del análisis estadístico para opacidad, índice de amarillo, índice de blancura

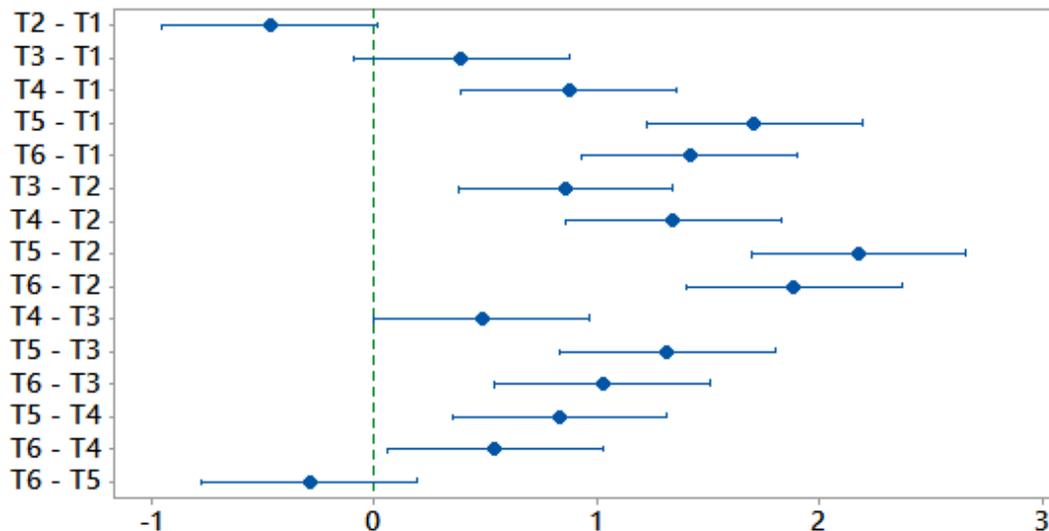
	Opacidad		Índice de amarillo		Índice de blancura			
T1	R1	26.34	T1	R1	1.56	T1	R1	64.70
	R2	26.50		R2	1.60		R2	64.55
	R3	26.88		R3	1.55		R3	64.27
T2	R1	26.07	T2	R1	0.91	T2	R1	65.89
	R2	26.20		R2	0.89		R2	65.82
	R3	26.05		R3	0.96		R3	65.88
T3	R1	26.92	T3	R1	0.87	T3	R1	64.72
	R2	26.97		R2	0.80		R2	64.74
	R3	27.00		R3	0.83		R3	64.66
T4	R1	27.66	T4	R1	2.06	T4	R1	62.33
	R2	27.48		R2	1.99		R2	62.58
	R3	27.20		R3	2.00		R3	62.82
T5	R1	28.42	T5	R1	2.13	T5	R1	61.45
	R2	28.07		R2	2.27		R2	61.59
	R3	28.35		R3	2.11		R3	61.55
T6	R1	27.88	T6	R1	1.25	T6	R1	63.24
	R2	28.11		R2	1.32		R2	62.93
	R3	27.97		R3	1.34		R3	63.01

ANOVA PARA OPACIDAD POR TRATAMIENTOS

Fuente	GL	SC Ajust	MC Ajust.	Fcal	p-value
Factor	5	10.472	2.094	67.320	0.000
Error	12	0.373	0.031		
Total	17	10.845			

Comparación múltiple Tukey

Factor	N	Media	Agrupación
T5	3	28.279	A
T6	3	27.988	A
T4	3	27.446	B
T3	3	26.964	B,C
T1	3	26.572	C,D
T2	3	26.105	D



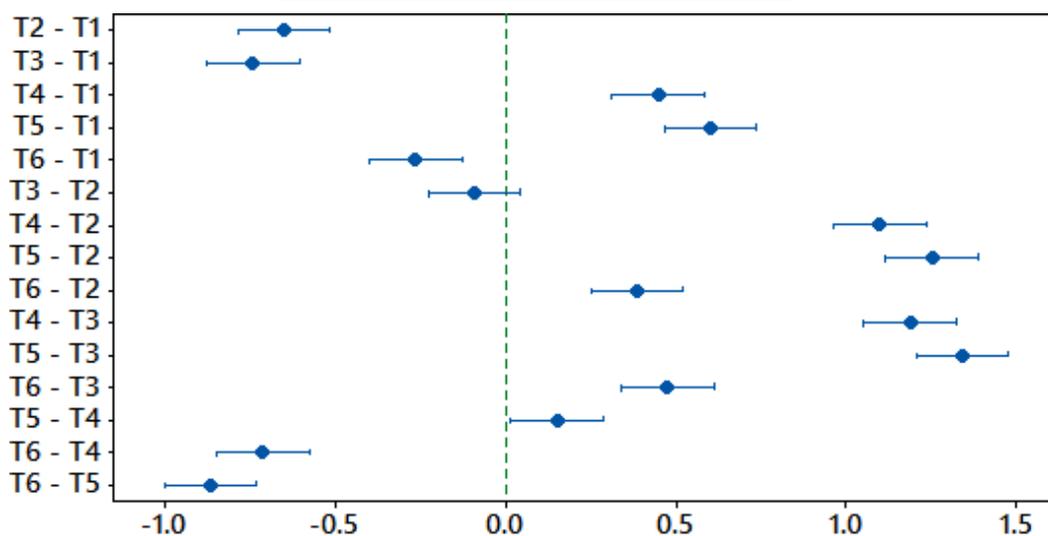
Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

ANOVA PARA ÍNDICE DE AMARILLO POR TRATAMIENTOS

Fuente	GL	SC Ajust	MC Ajust.	Fcal	p-value
Factor	5	4.614	0.923	374.76	0.000
Error	12	0.030	0.002		
Total	17	4.643			

Comparación múltiple Tukey

Factor	N	Media	Agrupación
T5	3	2.1714	A
T4	3	2.0186	B
T1	3	1.5705	C
T6	3	1.3073	D
T2	3	0.9217	E
T3	3	0.8315	E



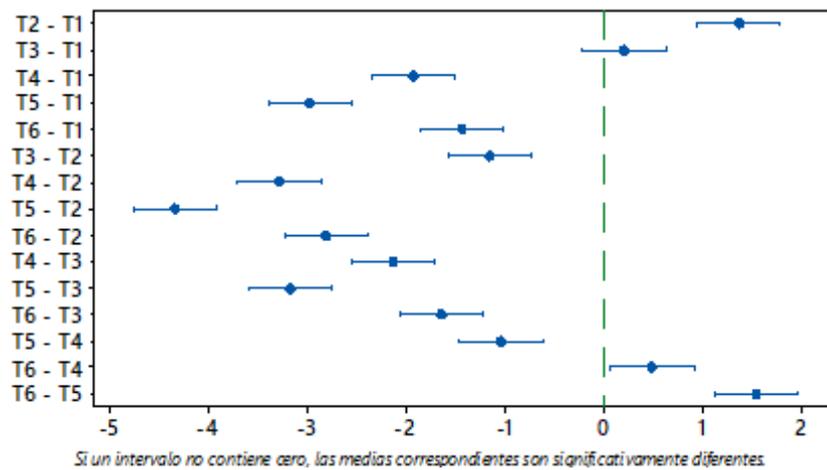
Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

ANOVA PARA *ÍNDICE DE BLANCURA* POR TRATAMIENTOS

Fuente	GL	SC Ajust	MC Ajust.	Fcal	p-value
Factor	5	38.173	7.635	322.74	0.000
Error	12	0.284	0.024		
Total	17	38.456			

Comparación múltiple Tukey

Factor	N	Media	Agrupación
T2	3	65.863	A
T3	3	64.707	B
T1	3	64.507	B
T6	3	63.06	C
T4	3	62.577	D
T5	3	61.53	E



ANEXO 05: Fotografías de la resistencia a la solubilidad en solventes

Agua destilada



Ácido acético 0.1 M



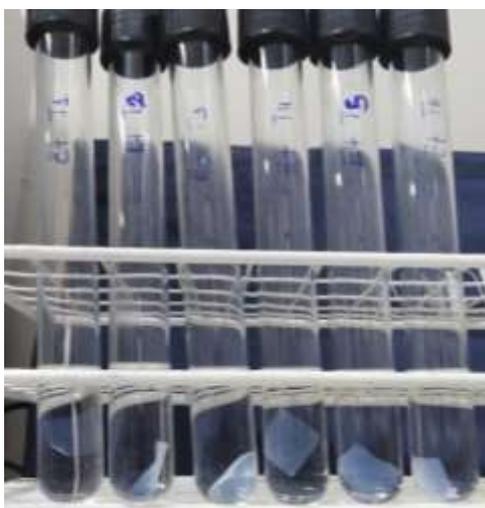
Éter



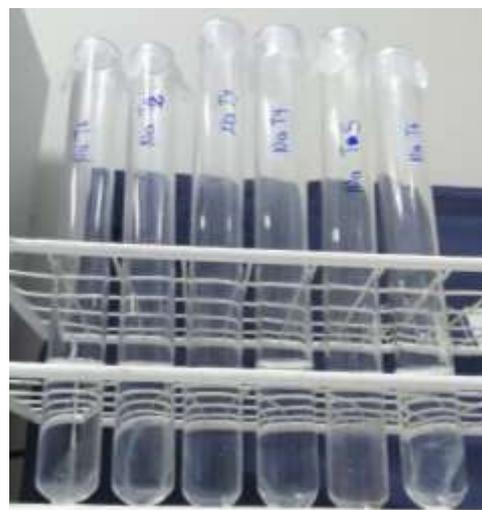
Ácido Clorhídrico 0.1 M



Alcohol Etilico 96°



Hidróxido de Sodio 0.1 M



ANEXO 06: Datos de las características mecánicas

Espesor de las biopelículas

Espesor (mm)							
	Espesor del papel	M1 con papel	M2 con papel	M3 con papel	M1 sin papel	M2 sin papel	M3 sin papel
T1	0.103	0.287	0.293	0.293	0.184	0.190	0.19
T2	0.103	0.273	0.271	0.294	0.17	0.168	0.191
T3	0.103	0.303	0.290	0.282	0.2	0.187	0.179
T4	0.103	0.318	0.307	0.309	0.215	0.204	0.206
T5	0.103	0.298	0.314	0.311	0.195	0.211	0.208
T6	0.103	0.304	0.305	0.311	0.201	0.202	0.208

Datos de Esfuerzo para T1

t (seg)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0.00	0	0	0.000	0.000
0.22	3	0.003	0.029	0.016
0.26	5	0.005	0.049	0.026
0.44	6	0.006	0.059	0.031
0.63	9	0.009	0.088	0.047
1.70	13	0.013	0.127	0.068

Largo cm	Ancho cm	Área (cm ²)
2.5	1	2.5

Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área trans (mm ²)
10	0.188	1.88

Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria
2.5	4	1.5	0.60

F (N)	At (mm ²)	Esfuerz max - σ (N/mm ²) (Mpa)
0.12740	1.88	0.068

Datos de Esfuerzo para T2

t (seg)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0	0	0	0.000	0.000
0.05	4	0.004	0.039	0.022
0.18	9	0.009	0.088	0.050
0.22	15	0.015	0.147	0.083
0.4	20	0.02	0.196	0.111

Largo cm	Ancho cm	Area (cm ²)
2.4	1	2.4

Ancho (mm)	Espesor (mm)	Area trans (mm ²)
10	0.176	1.763

Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria
2.4	4.7	2.3	0.96

F (N)	At (mm ²)	Esfuerz max - σ (N/mm ²) (Mpa)
0.19600	1.763	0.111

Datos de Esfuerzo para T3

t (seg)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0	0	0	0.000	0.000
0.53	2	0.002	0.020	0.011
0.97	3	0.003	0.029	0.017
1.26	5	0.005	0.049	0.028
1.47	8	0.008	0.078	0.044

Largo cm	Ancho cm	Area de muestra (cm ²)	
2	1	2	

Ancho (mm)	Espesor (mm)	Area trans (mm ²)	
10	0.176	1.763	

Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria
2	4.5	2.5	1.25

F (N)	At (mm ²)	Esfuerz max - σ (N/mm ²) (Mpa)	
0.07840	1.763	0.044	

Datos de Esfuerzo para T4

t (seg)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0	0	0	0.000	0.000
0.07	5	0.005	0.049	0.024
0.16	15	0.015	0.147	0.071
0.2	20	0.02	0.196	0.094

Largo cm	Ancho cm	Área (cm ²)	
1	1	1	

Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área trans (mm ²)	
10	0.208	2.083	

Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria
1	2.8	1.8	1.80

F (N)	At (mm ²)	Esfuerzo max - σ (N/mm ²) (MPa)	
0.19600	2.083	0.094	

Datos de Esfuerzo para T5

t (seg)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0	0	0	0.000	0.000
0.09	2	0.002	0.020	0.010
0.14	4	0.004	0.039	0.019
0.17	6	0.006	0.059	0.029
0.24	9	0.009	0.088	0.043
1.02	14	0.014	0.137	0.067
1.09	26	0.026	0.255	0.124
1.16	29	0.029	0.284	0.139

Largo cm	Ancho cm	Área (cm ²)	
1.3	1	1.3	

Ancho (mm)	Espesor (mm)	Area transl (mm ²)	
10	0.205	2.047	

Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria
1.3	3.5	2.2	1.69

F (N)	At (mm ²)	Esfuerz max - σ (N/mm ²) (MPa)	
0.28420	2.047	0.139	

Datos de Esfuerzo para T6

t (seg)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0	0	0	0.000	0.000
0.08	2	0.002	0.020	0.010
0.15	4	0.004	0.039	0.019
0.2	7	0.007	0.069	0.034
1.03	10	0.01	0.098	0.048
1.13	14	0.014	0.137	0.067
1.17	18	0.018	0.176	0.087

Largo cm	Ancho cm	Area (cm ²)	
1.3	1	1.3	

Ancho (mm)	Espesor (mm)	Area trans (mm ²)	
10	0.204	2.037	

Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria
1.3	4.5	3.2	2.46

F (N)	At (mm ²)	Esfuerz max - σ (N/mm ²) (MPa)	
0.17640	2.037	0.087	

PANEL FOTOGRÁFICO

Obtención del mucilago de nopal

Pesado de las pencas de nopal



Selección y pelado del nopal



Picado de la pulpa del nopal (aprox. 1cm x 1cm)



Dilución nopal y alcohol



Filtrado del mucilago de nopal



Secado del mucilago extraído



Molienda del mucilago



Tamizado del mucilago



Proceso de obtención del almidón de papa

Lavado del almidón de papa



Lavado en agua destilada del almidón



Separa el almidón del agua



Secado el almidón de papa



Proceso de elaboración de las biopelículas

Dilución de pectina



Dilución del almidón



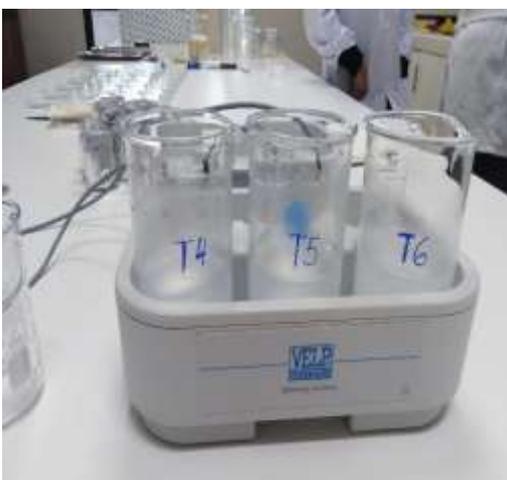
Dilución del mucilago de nopal



Mezcla de las diferentes formulaciones



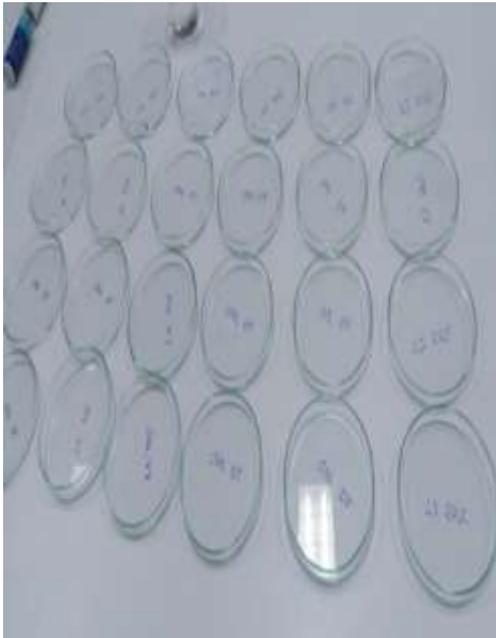
Mezcla de las diferentes formulaciones



Division de las formulaiones en placas



Diferentes formulaciones en placas



Secado de las placas

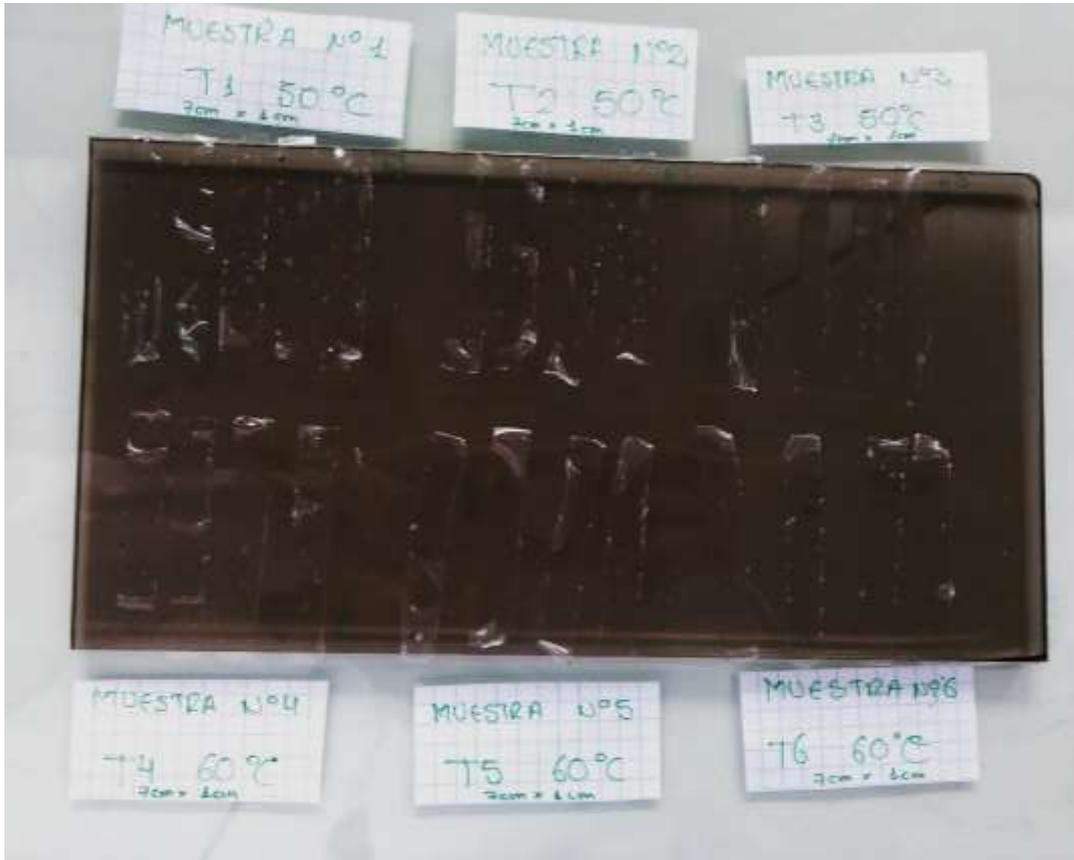


Obtención del biopolímero



Propiedades mecánicas

Biopolímero en tiras de 7cm x 1cm



Equipo encargado de medir la Elongación.



Tira del biopolímero en el equipo.



Medición del espesor de las biopelículas

