



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICO BIOLÓGICAS**  
**MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

**Desarrollo de películas comestibles a base de  
almidón acetilado y gelatina y su aplicación en un  
fruto modelo**

## **TESIS**

Que presenta

**ANA PATRICIA LEÓN LEYVA**

Para obtener el Grado de

**MAESTRA EN CIENCIA**

**Y**

**TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

Directores

**DRA. IRMA LETICIA CAMACHO HERNÁNDEZ**

**DR. JOSE DE JESÚS ZAZUETA MORALES**

Culiacán, Sinaloa, México

Febrero del 2018

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Caracterización Físicoquímica y Reológica de la Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa, bajo la dirección de la Dra. Irma Leticia Camacho Hernández y del Dr. José de Jesús Zazueta Morales, y la asesoría de la Dra. Noelia Jacobo Valenzuela y del Dr. Ernesto Aguilar Palazuelos. Ana Patricia León Leyva recibió beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT.



## **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**

### **CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de Culiacán Rosales, Sinaloa el día 15 del mes enero del año 2018, el (la) que suscribe IIA. Ana Patricia León Leyva alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos con número de cuenta 1566404-1, de la Unidad Académica Facultad de Ciencias Químico Biológicas, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dra. Irma Leticia Camacho Hernández y Dr. José De Jesús Zazueta Morales y cede los derechos del trabajo titulado “Desarrollo de películas comestibles a base de almidón acetilado y gelatina y su aplicación en un fruto modelo”, a la Universidad Autónoma de Sinaloa para su difusión, con fines académicos y de investigación por medios impresos y digitales.

La Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México) protege el contenido de la presente tesis. Los usuarios de la información contenida en ella deberán citar obligatoriamente la tesis como fuente, dónde la obtuvo y mencionar al autor intelectual. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Ana León*

IIA. Ana Patricia León Leyva

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme vida, brindarme salud y la oportunidad de continuar con mi crecimiento personal y profesional, así como la paciencia para concluir esta meta.

A mi esposo y compañero de vida, el **IIA. Julio César Izaguirre López**, por apoyarme incondicionalmente en cada decisión que he tomado; principalmente por alentarme a continuar con mi formación profesional, y ser comprensivo durante esta etapa. Por su paciencia en momentos de mucho trabajo y constante estrés, y por soportar la distancia durante casi un año, mientras finalizaba mi maestría. Gracias por su esfuerzo y amor incondicional, por dedicarse por completo a nuestra familia, a nuestro bienestar y felicidad. A nuestra hija **Aylin Cecilia**, por ser una buena niña, comprensiva y paciente; por soportar largas horas en el laboratorio esperando que realizara el trabajo experimental y por acompañarme cada vez que fue necesario, y portarse excelentemente. Ambos son mi más grande motivación, mi impulso para poder continuar con mi crecimiento personal y profesional, los amo con todo mi corazón.

A mis padres **Ana Cecilia Leyva Caro y Melchor León Cervantes** y a hermano **Gilberto Adrián** por estar conmigo a cada paso, por sus palabras de aliento en los momentos más difíciles, y por impulsarme y creer en mí en todo momento.

Al programa de la **Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos** de la Universidad Autónoma de Sinaloa, por haberme admitido y permitir que culmine esta meta profesional.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por la beca otorgada y el financiamiento para poder realizar mi trabajo de investigación.

A los **maestros del programa de la Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos** por contribuir con sus enseñanzas a mi formación profesional, en especial a todos aquellos que creyeron en mí y siempre tenían palabras de aliento.

A mi directora de tesis, la **Dra. Irma Leticia Camacho Hernández**, por su amistad y consejos, por aceptarme como su alumna y guiarme durante este proceso. Gracias por apoyarme durante la realización de mi trabajo de investigación y estar siempre dispuesta a ayudar en todo lo que estuviera en sus manos, dentro y fuera de lo académico. Por ser comprensiva y paciente, y tratar siempre con mucho afecto a mi niña.

Al **Dr. Ernesto Aguilar Palazuelos**, por haberme aceptado en su grupo de trabajo, por darme un espacio entre sus alumnos y por estar siempre dispuesto a aclarar mis dudas y apoyarme durante la realización del proyecto. Así como al **Dr. José de Jesús Zazueta Morales**, a la **Dra. Noelia Jacobo Valenzuela**, al **Dr. Armando Carrillo López** y al **MC. Víctor Limón Valenzuela** por su ayuda, consejos y amistad.

A los integrantes del laboratorio: **MC. Xóchitl Ariadna Ruíz Armenta, IBQ. Marco, Antonio Sánchez Chilero, MC. Christian Valenzuela Berrelleza, Karen Itzel Carillo Cañedo, Sarahi Agramón Velázquez y Paola Crisabel Reyes Urrea**, por su apoyo y amistad durante mi estancia en Culiacán. En especial a la **MC. Perla Rosa Fitch Vargas** y al **MC. Abraham Calderón Castro**, por estar siempre dispuestos a ayudar y a guiarme a lo largo de toda mi maestría; por brindarme su amistad y demostrar siempre confianza e interés. Gracias por siempre escuchar y aconsejarme tanto en temas de laboratorio como en lo personal, y sobre todo muchas gracias por el cariño que le han demostrado a Aylin, por hacernos sentir parte de una familia, al verla como su sobrina y acompañarla en momentos importantes, e incluso hasta cuidarla mientras

trabajaba en el laboratorio, en verdad los estimamos mucho. Gracias a todo el equipo de trabajo por recibirnos a ambas con mucho cariño, todos se han convertido en mi segunda familia.

A mis ayudantes **Luis Fernando Pérez Vega y Jefte Esaú Ruíz Armenta** por su ayuda en la realización de las técnicas poscosecha, por acompañarme en cada medición, incluso los fines de semana, y hacer más ameno el trabajo en el laboratorio, sin ustedes no hubiera podido concluir la segunda etapa del proyecto.

A las integrantes del laboratorio de **Fisiología y Tecnología Poscosecha** la **QFB. Carolina Isabel Vázquez Herrera**, y la **MC. Claudia Barraza Elenes** por su apoyo en la realización de la segunda etapa del proyecto. Gracias maestra por su amistad, por estar siempre dispuesta a ayudar dentro y fuera del laboratorio, y por ser siempre amable, comprensiva y muy afectuosa.

A mis amigas la **MC. Guadalupe Cervantes Rubio** y la **MC. Bianca Irina Valeria Bojórquez Márquez**, quienes siempre me orientaron durante esta etapa, dentro y fuera de la escuela, sobre todo los primeros meses de mi estancia en Culiacán; gracias por los buenos momentos que pasamos juntas.

A todas las personas que directa e indirectamente contribuyeron a la realización de este proyecto, y contribuyeron con mi formación personal y profesional, muchas gracias.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE CUADROS	vii
I RESUMEN	1
ABSTRACT	3
II INTRODUCCIÓN	5
III REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	9
A PELÍCULAS Y RECUBRIMIENTOS COMESTIBLES	9
1 Historia	10
2 Importancia y funciones	11
3 Propiedades de las películas comestibles	14
a Propiedades mecánicas	15
b Propiedades de barrera	16
1) Permeabilidad al vapor de agua	16
2) Permeabilidad de gases	18
4 Componentes de las películas comestibles	20
5 Materiales utilizados en la elaboración de películas y recubrimientos comestibles	21
a Polisacáridos	22
b Lípidos	23
c Proteínas	24
B GELATINA	26
1 Estructura y composición	26
2 Cambios estructurales de la gelatina en tratamientos térmicos	29
3 Aplicaciones industriales de la gelatina	31
a Películas comestibles a base de gelatina	31
C ALMIDÓN	33
1 Estructura y composición	33
2 Cambios estructurales del almidón en tratamientos térmicos	36

3	Aplicaciones industriales del almidón	38
a	Películas a base de almidón	38
4	Almidones modificados	40
a	Modificación química	41
1)	Modificación química por acetilación	43
a)	Acetilación por extrusión reactiva	46
D	EXTRUSIÓN	47
1	Fundamentos teóricos	47
2	Cambios estructurales del almidón durante el proceso de extrusión	50
E	APLICACIÓN POSCOSECHA	51
1	Empleo de películas y recubrimientos comestibles para la conservación de frutas y hortalizas	51
2	Efecto de las películas y recubrimientos comestibles sobre las propiedades de calidad de frutas y hortalizas	53
a	Pérdida de agua	53
b	Firmeza	54
c	Color	55
IV	JUSTIFICACIÓN	57
V	OBJETIVOS	58
A	GENERAL	58
B	ESPECÍFICOS	58
VI	MATERIALES Y MÉTODOS	59
A	MATERIALES	59
1	Materia prima	59
B	METODOLOGÍA	59
1	Elaboración de películas comestibles, caracterización y optimización	59
a	Diseño experimental	59
b	Modificación química del almidón	62
c	Elaboración de las películas comestibles	62

d	Caracterización fisicoquímica de las películas comestibles	64
1)	Propiedades mecánicas	64
2)	Propiedades de barrera	66
a)	Permeabilidad al vapor de agua	66
b)	Solubilidad en agua	67
e	Optimización	68
f	Preparación de la formulación óptima y elaboración de películas comestibles	68
2	Validación del efecto de un recubrimiento comestible de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol sobre las características de calidad de un fruto modelo	69
a	Aplicación de los recubrimientos comestibles	69
b	Evaluación de parámetros de calidad en un fruto modelo	71
1)	Análisis físicos	71
a)	Pérdida de peso	71
b)	Color externo	71
c)	Color interno	72
d)	Firmeza	72
2)	Análisis químicos	73
a)	Acidez titulable	73
b)	Determinación de pH	74
c)	Sólidos Solubles Totales (°Brix)	74
c	Análisis estadístico	74
VII	RESULTADOS Y DISCUSIONES	76
A	ELABORACIÓN DE PELÍCULAS COMESTIBLES, CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN	76
1	Resultados experimentales de las variables de respuesta evaluadas a las películas comestibles	76
a	Propiedades Mecánicas	76
1)	Resistencia a la ruptura	76
2)	Deformación	83

b	Propiedades de Barrera	87
1)	Permeabilidad al vapor de agua	87
b)	Solubilidad	90
2	Optimización	94
B	VALIDACIÓN DEL EFECTO DE UN RECUBRIMIENTO COMESTIBLE DE ALMIDÓN DE MAÍZ ACETILADO, GELATINA Y GLICEROL SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD EN UN FRUTO MODELO	99
1	Análisis físicos	99
a	Pérdida de peso	99
b	Color externo	104
c	Color interno	108
d	Firmeza	110
2	Análisis químicos	115
a	Acidez Titulable	115
b	pH	118
c	Sólidos Solubles Totales	121
VIII	CONCLUSIONES	125
IX	BIBLIOGRAFÍA	127
	ABREVIATURAS	154

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
1	Funciones selectivas y activas de películas y recubrimientos comestibles.	13
2	Estructura química de la gelatina.	27
3	Componentes básicos del almidón: (a) Amilosa; (b) conformación helicoidal de la amilosa; (c) amilopectina; (d) estructura molecular de la amilopectina.	35
4	Modificación química del almidón.	42
5	Reacciones químicas durante la acetilación.	44
6	Principales componentes de un extrusor de tornillo simple.	49
7	Esquema de acetilación del almidón mediante el proceso de extrusión.	63
8	Esquema de la elaboración de películas comestibles de gelatina, almidón acetilado y glicerol.	65
9	Diagrama del desarrollo experimental de la validación de un recubrimiento comestible optimizado.	70
10	Películas comestibles de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol.	78
11	Efecto del contenido de gelatina y glicerol sobre la resistencia a la ruptura de películas comestibles elaboradas a partir de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol.	82
12	Efecto del contenido de gelatina y glicerol sobre la deformación de películas comestibles elaboradas a partir de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol.	85

13	Efecto del contenido de gelatina y glicerol sobre la permeabilidad al vapor de agua de películas comestibles elaboradas a partir de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol.	89
14	Efecto del contenido de gelatina y glicerol sobre la solubilidad de películas comestibles elaboradas a partir de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol.	92
15	Deseabilidad individual y global de las variables de proceso y respuestas analizadas durante la optimización.	96
16	Porcentaje de pérdida de peso de frutos de mango cv. Haden almacenados durante 20 días a $12 \pm 1$ °C.	101
17	Diferencia total de color externo de frutos de mango cv. Haden almacenados durante 20 días a $12 \pm 1$ °C.	105
18	Diferencia total de color interno de frutos de mango cv. Haden almacenados durante 20 días a $12 \pm 1$ °C.	109
19	Firmeza de frutos de mango cv. Haden almacenados durante 20 días a $12 \pm 1$ °C.	111
20	Contenido de ácido cítrico de frutos de mango cv. Haden almacenados durante 20 días a $12 \pm 1$ °C.	116
21	Valores de pH de frutos de mango cv. Haden almacenados durante 20 días a $12 \pm 1$ °C.	119
22	Contenido de sólidos solubles totales (°Brix) de frutos de mango cv. Haden almacenados durante 20 días a $12 \pm 1$ °C.	122

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
1	Usos posibles de películas comestibles y recubrimientos comestibles.	12
2	Factores y niveles de variación de las variables del proceso empleadas en el diseño experimental ( $\alpha=1.4142$ ).	60
3	Diseño experimental empleado para obtener diferentes combinaciones de contenido de gelatina y contenido de glicerol para la elaboración de películas comestibles.	61
4	Valores experimentales de las variables de respuesta evaluadas a películas comestibles de almidón acetilado, gelatina y glicerol.	77
5	Análisis de varianza de las variables de respuesta evaluadas a películas comestibles de almidón acetilado, gelatina y glicerol.	79
6	Modelo estadístico de las variables de respuesta evaluadas a películas comestibles de almidón acetilado, gelatina y glicerol.	80
7	Criterios y límites para la optimización.	95
8	Valores promedio de los parámetros físicos y químicos obtenidos al momento de la cosecha de frutos de mango cv. Haden.	100

## I RESUMEN

Hoy en día existen diversas investigaciones en cuanto al desarrollo y aplicación de Películas (PC) y Recubrimientos Comestibles (RC) con la finalidad de mantener la integridad de los alimentos. Estudios previos han demostrado que las PC elaboradas a partir de almidón son ampliamente utilizadas debido a que presentan buenas propiedades mecánicas, sin embargo, poseen deficientes propiedades de barrera contra la humedad. Por otro lado, las PC elaboradas a base de gelatina, son barreras excelentes al oxígeno, dióxido de carbono y algunos compuestos aromáticos; no obstante, sus propiedades mecánicas no son tan eficientes. En vista de que las PC elaboradas con un solo componente presentan deficiencias, es necesario reforzar sus propiedades mediante la combinación de biopolímeros. Otra alternativa para mejorar las propiedades funcionales de las PC, principalmente las propiedades de barrera, son las modificaciones químicas del almidón; la acetilación es una modificación química que sustituye los grupos hidroxilo de los monómeros de glucosa por grupos acetilos, incrementando su hidrofobicidad. Recientemente se ha utilizado la tecnología de extrusión para llevar a cabo la acetilación del almidón, debido a las ventajas que presenta sobre el método convencional. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar el efecto del contenido de gelatina, glicerol y almidón modificado por acetilación en la elaboración de PC y su aplicación como RC en un fruto modelo. Para cumplir con este objetivo, el estudio se dividió en dos etapas; la primera etapa consistió en la elaboración de PC a base de almidón de maíz modificado por acetilación, gelatina y glicerol, y la caracterización de las mismas. Para la modificación del almidón por acetilación se utilizó la tecnología de extrusión, obteniendo un grado de sustitución de 0.2. Las PC fueron elaboradas por la técnica de

casting, utilizando un diseño experimental central compuesto rotatable de segundo orden. Para el análisis de datos se utilizó la Metodología de Superficie de Respuesta; mediante el método numérico se buscaron las mejores condiciones de Contenido de Gelatina (CG) y Contenido de Glicerol (CP), siendo estos los factores de estudio. Las variables de respuesta estudiadas fueron: Resistencia a la Ruptura (RR), Deformación (D), Permeabilidad al Vapor de Agua (PVA) y Solubilidad (S); sobre las cuales tanto CG como CP presentaron efecto significativo. De la optimización se obtuvieron los siguientes valores: CG de 17.99 % y CP de 15 %. Con estas condiciones óptimas se obtuvieron los siguientes valores predichos: RR= 23.12 N, D= 9.17 mm, PVA=  $1.99 \times 10^{-11}$  g/Pa s m y S= 32.41 %. En la segunda etapa se estudió el efecto del RC optimizado sobre las características de calidad en frutos de mango cv. Haden. Los frutos fueron recubiertos con cuatro tratamientos: Control, Cera de Carnauba (CC), Almidón de maíz nativo con glicerol (ANP) y Tratamiento óptimo (AGG), posteriormente fueron almacenados en refrigeración a  $12 \pm 1$  °C durante 20 días. Durante ese periodo se evaluaron las siguientes características de calidad: Pérdida de Peso (%PP), diferencia total de color ( $\Delta E$ ) externo e interno, firmeza, Acidez Titulable (AT), pH y contenido de Sólidos Solubles Totales (SST). El tratamiento AAG retardó la maduración de los frutos al disminuir %PP, mantener el color, retrasar el ablandamiento, disminuir el incremento de pH y SST, y aplazar la disminución de AT, en comparación con los frutos sin recubrir (Control). Los resultados obtenidos indican que se pueden utilizar recubrimientos comestibles elaborados a partir de una formulación de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol para mantener las características de calidad y alargar la vida poscosecha del fruto de mango cv. Haden.

## ABSTRACT

Nowadays there are several researches regarding the development and application of Edible Films (EF) and Coatings (EC) in order to maintain the integrity of the food. Previous studies have shown that EF made from starch are widely used because they have good mechanical properties, however they have poor moisture barrier properties. On the other hand EF made from gelatin are excellent barriers to oxygen, carbon dioxide and some aromatic compounds; however, its mechanical properties are not as efficient. In view of the fact that EF made with a single component have deficiencies, it is necessary to reinforce their properties by combining biopolymers. Another alternative to improve the functional properties of the EF, mainly the barrier properties, are the chemical modifications of the starch; acetylation is a chemical modification that replaces the hydroxyl groups of the glucose monomers with acetyl groups, increasing their hydrophobicity. Recently, extrusion technology has been used to carry out acetylation of starch, due to the advantages it has over the conventional method. Therefore the aim of this research work was to evaluate the effect of the content of gelatin, glycerol and acetylated corn starch the preparation of EF and its application as EC in a model fruit. To accomplish this, the study was divided into two stages; the first stage consisted in the preparation of EF of acetylated corn starch, gelatin and glycerol, and their characterization. For the modification of starch by acetylation the extrusion technology was used, obtaining a substitution degree of 0.2. The EF was prepared by the casting technique, using a central composite rotatable design. For the data analysis the Response Surface Methodology was used, through the numerical method the best conditions of Gelatin Content (GC) and Glycerol Content (PC) were searched, these being the study factors. The response variables studied were: Breaking Strength (BS),

Deformation (D), Water Vapor Permeability (WVP) and Water Solubility (S). Both factors (GC and PC) presented significant effect on all of them. From the optimization the following values were obtained: GC of 17.99% and PC of 15%. With these optimal conditions the following predicted values were obtained: BS= 23.12 N, D= 9.17 mm, WVP=  $1.99 \times 10^{-11}$  g/Pa s m y S= 32.41 %, which were tested experimentally. No statistically significant difference ( $p > 0.05$ ) was found between the obtained values and the predicted values. On the second stage, the effect of optimized EC on the quality characteristics of mango fruits cv. Haden was studied. The fruits were coated with four treatments: Control, Carnauba Wax (CW), Native Corn Starch (NCS) and Optimal Treatment (OT). Subsequently, they were stored under refrigeration at  $12 \pm 1$  °C for 20 days. During this period the following quality characteristics were evaluated: Weight Loss (WL), total color difference ( $\Delta E$ ), firmness, Titratable Acidity (TA), pH and Soluble Solids Content (SSC). The OT treatment delayed the ripening of the fruits by decreasing WL, maintaining the color, delaying the softening, decreasing the increase of pH and SSC and postponing the decrease of TA, in comparison with the uncoated fruits (Control). The results obtained in this study indicate that edible coatings elaborated from a formulation of acetylated corn starch, gelatin and glycerol can be used to maintain the quality characteristics and extend the post-harvest life of mango fruits cv. Haden.

## II INTRODUCCIÓN

La alta demanda de los consumidores por productos con características naturales y de larga vida, ha determinado el estudio de nuevas técnicas de preservación, entre ellas, el estudio de la formulación y desarrollo de películas comestibles con el fin de ser utilizadas como recubrimiento de alimentos para aumentar su vida útil (Famá y col 2009). Un recubrimiento comestible es definido como una capa delgada de material comestible formado como un revestimiento sobre el alimento, mientras que una película comestible es una capa preformada y delgada elaborada con material comestible y la cual una vez elaborada, puede ser colocada sobre el alimento o entre los componentes del mismo (McHugh 2000).

Las películas y los recubrimientos comestibles tienen diferentes funciones, entre las cuales pueden retardar la migración de humedad, controlar el transporte de gases ( $O_2$ ,  $CO_2$  y etileno), retener componentes volátiles, servir de vehículo de aditivos, mejorar las propiedades mecánicas y de manejo del alimento, además de impartir una mayor integridad a la estructura del mismo, manteniendo las buenas propiedades mecánicas y organolépticas de los alimentos (Kester y Fennema 1986).

Las soluciones formadoras de películas y recubrimientos comestibles pueden incluir polisacáridos, compuestos de naturaleza proteica, lipídica o por una mezcla de los mismos. La última permite aprovechar las propiedades de cada compuesto y la sinergia entre ellos (Quintero y col 2010). Dependiendo de las sustancias que los forman, las películas y recubrimientos comestibles presentan ciertas propiedades mecánicas y de barrera al agua,  $O_2$  y  $CO_2$  (Vázquez-Briones y col 2013).

Los polisacáridos y las proteínas son buenos materiales para la formación de películas y recubrimientos comestibles (Quintero y col 2010). Las proteínas forman recubrimientos que desarrollan muy buenas propiedades de barrera al O<sub>2</sub>, lo que ayuda a controlar el intercambio de gases entre el fruto y el medio ambiente, así como propiedades mecánicas que son muy favorables para recubrir alimentos (Vázquez-Briones y col 2013). El almidón nativo, es usado actualmente en la industria como recubrimientos, por ser un producto biodegradable, con características no tóxicas, de naturaleza abundante y de bajo costo. Sin embargo, el uso del almidón sin modificar es limitado debido a su fragilidad en el área de empaques, el deterioro de las propiedades mecánicas a condiciones ambientales por la exposición con la humedad, la reducida procesabilidad debido a su alta viscosidad, así como su incompatibilidad con algunos solventes y polímeros (Peñaranda-Contreras y col 2008).

Una alternativa para reducir estos inconvenientes es el uso de almidones modificados. La modificación del almidón se puede hacer por varios métodos, pero los más comunes son los físicos y químicos. La modificación química del almidón está directamente relacionada con las reacciones de los grupos hidroxilo del polímero de almidón (Peñaranda-Contreras y col 2008). La acetilación es una modificación química por esterificación, en la cual se sustituyen sus grupos hidroxilos por grupos acetilos que le brindan mayor estabilidad, variando las propiedades fisicoquímicas y funcionales de los almidones (Prieto-Méndez y col 2010).

Las películas de almidón modificado han ganado atención académica e industrial debido a que son biodegradables, tienen un bajo costo y poseen una buena solubilidad y propiedades mecánicas mejoradas (Shah y col 2016). La mezcla de almidón

modificado con proteína puede proporcionar a la película de estabilidad mecánica necesaria para mantener la integridad de los alimentos y una barrera contra la humedad (Márquez-Hernández 2010).

El mango (*Mangifera indica* L.) es uno de los frutos más apetecidos mundialmente para consumo en fresco, por su delicioso sabor y su alto valor nutritivo (Chiumarelli y col 2011). Se ha reportado que es una importante fuente de ácido ascórbico, carotenoides y de compuestos fitoquímicos y flavonoides (Pierson y col 2014). Por ser un fruto climatérico, la madurez organoléptica o de consumo la adquiere después de cosechado entre los días seis y diez, en función de la variedad y el medio de almacenamiento. En este periodo presenta su principal pico respiratorio, que se identifica por el incremento de la actividad respiratoria, lo que desata la cascada de cambios en el color, olor, sabor y textura (Pérez y col 2004). El fruto es susceptible a enfermedades y sensible a daño por frío, cuando es almacenado a temperaturas menores de 13°C, aspectos que lo hacen un producto de carácter perecedero, de vida útil relativamente corta, lo que limita su potencial de conservación, transporte, manipulación, almacenamiento y comercialización (Baldwin y col 1999). Frente a la perecibilidad del mango, se han implementado diferentes técnicas para contrarrestar esta situación y prolongar la vida poscosecha. Una de estas técnicas consiste en la utilización de recubrimientos comestibles. Esta tecnología crea una atmosfera alrededor del vegetal, proporcionando una barrera semipermeable a los gases implicados en el proceso respiratorio, el CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> al vapor de agua, producto de la transpiración, debido a esta afectación fisiológica los vegetales retardan su metabolismo y la producción de etileno (Sothornvit y Rodsamran 2008).

Debido a lo previamente mencionado, el objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar el efecto del contenido de gelatina, glicerol y almidón acetilado en la elaboración de películas comestibles y su aplicación como recubrimiento en un fruto modelo.

### III REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### A PELÍCULAS Y RECUBRIMIENTOS COMESTIBLES

En la actualidad el consumidor es más consciente de la relación existente entre la salud y la dieta, por lo que busca productos más frescos, con vida útil prolongada y con un mínimo contenido de conservadores. Esto se traduce en alimentos de mejor calidad, por lo que se ha fomentado la investigación de técnicas alternativas de conservación, entre las que se encuentran las películas y recubrimientos comestibles (Domínguez-Martínez 2017). Un recubrimiento comestible es definido como una capa delgada de material comestible formado como un revestimiento sobre el alimento, mientras que una película comestible es una capa preformada y delgada elaborada con material comestible y la cual una vez elaborada, puede ser colocada sobre el alimento o entre los componentes del mismo (McHugh 2000).

La principal diferencia entre ambos sistemas comestibles es que los recubrimientos comestibles son aplicados en forma líquida sobre el alimento, generalmente por inmersión del producto en una solución, y las películas comestibles son el primer lugar preformadas como láminas sólidas las cuales son posteriormente aplicadas en forma de recubrimiento sobre el alimento (McHugh y Senesi 2000). La tendencia de las investigaciones respecto a estas tecnologías, es la caracterización de películas fuera del alimento y en base a las propiedades estudiadas adecuar las características al objeto de aplicación. En los últimos años las películas y recubrimientos comestibles han atraído cada vez más interés, principalmente por dos razones; en primer lugar, los recubrimientos comestibles pueden mejorar la calidad de los alimentos al actuar como barreras de humedad, gases, aromas y lípidos, y proporcionar protección a un

producto alimenticio. En segundo lugar, tales películas son biodegradables e incluso se pueden comer con alimentos, lo que podría reducir la contaminación de películas plásticas no biodegradables (Cao y col 2007a).

## **1 Historia**

Los recubrimientos y películas comestibles se han empleado durante siglos principalmente para prevenir la pérdida de humedad y mantener la calidad y textura de los alimentos durante su almacenamiento (Jooyandeh 2011). Existen reportes que datan de los siglos XII y XIII en los que se menciona que en China se realizaba la inmersión de naranjas y limas en cera para retardar la pérdida de agua (Kaplan 1986; Greener y Fennema 1994). En Europa este proceso era conocido como “larding”, el cual consistía en el almacenamiento de frutas con ceras o grasas para su posterior consumo. Este proceso prevenía la pérdida de agua, pero el grosor de la envoltura interfería en el intercambio gaseoso natural, lo que producía productos de menor calidad (Contreras-Madellin y Labuza 1981). Posteriormente en el siglo XV, una película comestible proteínica denominada “yuba”, elaborada a partir de leche de soya hervida, se utilizó en Japón y otras regiones de Asia para mejorar la apariencia y mantener la calidad de algunos alimentos (Gennadios y col 1993). En el siglo XIX, la sacarosa comenzó a utilizarse como una capa protectora en nueces, almendras y avellanas para prevenir la oxidación y rancidez durante el almacenamiento (Contreras-Madellin y Labuza 1981); además se emplearon películas a base de gelatina para la preservación de carnes y otros alimentos (Nussinovitch y Lurie 1995). Pero quizá la aplicación más importante se produciría en el siglo XX, con el desarrollo de emulsiones de ceras y aceite en agua utilizadas en frutas para optimizar su apariencia, ser vehículo

de fungicidas y para controlar su maduración y retrasar la pérdida de agua (Kester y Fennemma 1986). Un gran número de películas de polisacáridos, incluyendo alginatos, carragenanos, éteres de celulosa, pectina, y derivados de almidón, se han utilizado para mejorar la calidad de almacenamiento de carne. A lo largo de los últimos 40 años, se han realizado un gran número de investigaciones en la formulación, aplicación, y caracterización de películas y recubrimientos comestibles (Debeaufort y col 1998).

## **2 Importancia y funciones**

El desarrollo de películas y recubrimientos comestibles ha tomado mucha importancia debido a que el uso de estos materiales permite aumentar la vida útil, mejorar las propiedades organolépticas y reducir el uso de materiales de embalaje no degradables en muchos productos alimenticios (Aguilar-Méndez y col 2012). Pueden cumplir muchos de los requisitos involucrados en la comercialización de alimentos entre los que destacan el valor nutricional, la sanidad, alta calidad, estabilidad y economía, al realizar una o más de las funciones indicadas en el **Cuadro 1**.

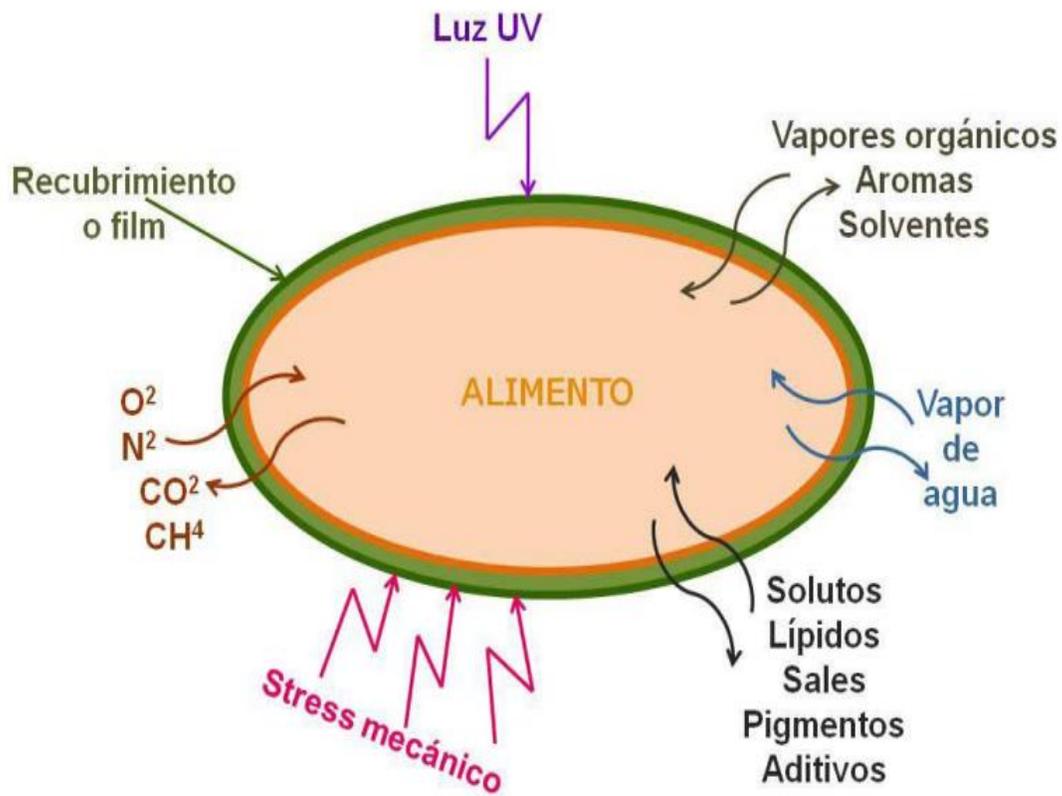
Las películas en el área de los alimentos funcionan como barreras selectivas para la transferencia de gases, humedad y nutrientes; son utilizadas porque ayudan a disminuir el deterioro de productos alimenticios causado por factores ambientales. De igual manera, se buscan que eviten o disminuyan la oxidación y pérdida de compuestos volátiles responsables de sabores y propiedades específicas de los alimentos (**Figura 1**) (Domínguez-Courtney y Jiménez-Munguía 2012). Se han establecido ciertas características deseables en un recubrimiento como son: no estar compuesto de tóxicos o alérgenos; proveer al alimento de estabilidad estructural y prevenir de daños mecánicos durante su transporte, manipulación y distribución;

**Cuadro 1.** Usos posibles de películas y recubrimientos comestibles.

<b>Función/Aplicación</b>	<b>Tipo adecuado de película</b>
<b>Retardar migración de humedad</b>	Lípido, compuesto <sup>a</sup>
<b>Retardar migración de gas</b>	Hidrocoloide, lípido o compuesto
<b>Retardar migración de aceite y grasa</b>	Hidrocoloide
<b>Retardar migración de soluto</b>	Hidrocoloide, lípido o compuesto
<b>Mejorar la integridad estructural o propiedades de manejo</b>	Hidrocoloide, lípido o compuesto
<b>Retener compuestos volátiles del sabor</b>	Hidrocoloide, lípido o compuesto
<b>Vehículo de aditivos alimentarios</b>	Hidrocoloide, lípido o compuesto

<sup>a</sup>Una película compuesta consiste de una combinación de componentes lipídicos e hidrocoloides para formar una bicapa o conglomerado.

Fuente: (Greener y Fennema 1994).



**Figura 1.** Funciones selectivas y activas de películas y recubrimientos comestibles.

Fuente: Debeaufort y col 1998.

proporción de cobertura uniforme al alimento para lo cual debe contar con una buena adherencia a su superficie; mantener el contenido adecuado de humedad por lo que su composición debe diseñarse para controlar en ambos sentidos la migración de agua de alimento protegido; ser semipermeable de modo que mantenga un equilibrio de los gases implicados en la respiración y como consecuencia de este efecto retardar la senescencia; estabilizar el aroma, sabor y valor nutritivo previniendo la pérdida de absorción de componentes que afecten esos parámetros sin afectar las características organolépticas; proporcionar protección contra el deterioro; servir como soporte para aditivos como antioxidantes y nutrientes y que la tecnología y la materia prima involucrada en la producción de estos recubrimientos sea accesible y viable económicamente (Pavlath y Orts 2009).

### **3 Propiedades de las películas comestibles**

Las películas comestibles presentan diferentes propiedades funcionales que dependerán de su formulación y del proceso de elaboración. Entre las propiedades más importantes evaluadas en las películas comestibles se encuentran las propiedades de barrera a gases como el O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> y al vapor de agua, el porcentaje de materia soluble que orienta las aplicaciones de la película y parámetros de apariencia, especialmente cuando están diseñadas para utilizarse en alimentos (Márquez-Hernández 2010). Otra característica a evaluar son las propiedades mecánicas; es muy importante que la película o recubrimiento comestible, posea buenas propiedades mecánicas pues, por mucho que dé resultados óptimos en las propiedades anteriores, de nada serviría si no va a conservar una integridad mínima durante el manejo, embalaje y transporte (Debeaufort y col 1998).

## **a Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas son importantes para las películas y los recubrimientos comestibles, ya que proporcionan una indicación de la durabilidad de las películas y la capacidad del revestimiento para mejorar la integridad mecánica de los alimentos (Regalado y col 2006). La resistencia a la tracción y la elongación a la ruptura, se utilizan con frecuencia para caracterizar las propiedades mecánicas de las películas; la resistencia a la tracción es la tensión máxima soportada por la película hasta el momento en que colapsa. La elongación a la ruptura es una medida de la flexibilidad de la película y se puede considerar como una característica que define la capacidad de la película para deformarse en su lugar antes de que colapse. Estas mediciones son importantes ya que las propiedades mecánicas de las películas o recubrimientos dependen de la naturaleza filmogénica del material utilizado, que está directamente relacionado con su cohesión estructural (Lacroix y Ouattara 2000). Las películas y recubrimientos comestibles deben ser resistentes a la ruptura y la abrasión, para reforzar la estructura de los alimentos y facilitar el manejo y/o ser lo suficientemente flexibles para adecuarse a cualquier deformación del producto sin romperse (Andrade-Pizarro y col 2015).

Múltiples factores, como la composición de la película, la temperatura, la humedad relativa y el tiempo de almacenamiento, afectan las propiedades mecánicas (Guilbert y Biquet 1995). Las interacciones entre el material formador de la película con otras sustancias como agua, plastificantes, lípidos y otros aditivos dispersos en la matriz, influyen notablemente en su comportamiento mecánico (Guilbert y col 1995).

Es posible mejorar las propiedades mecánicas mediante la adición de plastificantes, dado que estos compuestos debilitan las interacciones moleculares del biopolímero incrementando su flexibilidad y favoreciendo la formación de una red estructural más homogénea, lo que a su vez permite una mejor distribución de las sustancias hidrofóbicas (Park y col 2001). En general, la adición de plastificantes conduce a una disminución en resistencia a la tracción y un aumento en la elongación (Guilbert y Biquet 1995).

Las propiedades mecánicas de las películas podrían proporcionar una Indicación de la integridad esperada de la película en condiciones de estrés que podría ocurrir durante el procesamiento, manejo y almacenamiento (Park y col 2001). Las propiedades físicas de las películas antes mencionadas, influyen la efectividad de la aplicación de estos empaques en el campo de los alimentos y por consiguiente la calidad del alimento almacenado. Las propiedades mecánicas aseguran la integridad y la conservación de los empaques, mientras que las propiedades tales como la humedad, la resistencia al agua y la permeabilidad al vapor de agua son importantes, ya que determinan la protección que se le brinda al alimento mientras que éste, está en contacto con el agua, así como la calidad del envase o empaque cuando se aplica en alimentos con una alta actividad de agua (Bohórquez y col 2016).

## **b Propiedades de barrera**

### **1) Permeabilidad al vapor de agua**

Una propiedad importante de las películas es su función como barreras contra la humedad, ya que se busca que las películas comestibles disminuyan la transferencia

de humedad entre el producto y el medio. Dicha propiedad es medida con el valor de permeabilidad a vapor de agua. Se requiere que la permeabilidad al vapor de agua sea lo más baja posible (Zhong y Xia 2008).

La permeabilidad al vapor de agua es un fenómeno de difusión, que se define como la razón a la que el vapor de agua atraviesa una unidad de superficie o espesor de cierto material, y cuya transmisión es provocada por la diferencia de presión existente en ambos lados del material, bajo ciertas condiciones de temperatura y humedad relativa (Guilbert y col 1995). La transferencia de agua en materiales poliméricos ocurre por difusión molecular. Este 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 y (3) evaporación a partir de la superficie de la película y su consecuente dispersión en el aire (Kester y Fennema 1986).

La permeabilidad de una película comestible varía en función del polímero. Los materiales poliméricos presentan un amplio rango de propiedades dependientes de su composición y estructura química, interacción establecida entre éste y la molécula del permeante, el tipo de fuerzas entre las cadenas poliméricas que forman la matriz del film, el grado de entrecruzamiento entre las moléculas, la cristalinidad y la presencia de plastificantes o aditivos y condiciones de procesamiento, factores que afectan las propiedades de barrera a los gases y vapores. Las películas basadas en compuestos de naturaleza hidrófoba como resinas y ceras, proteínas no solubles en agua, son las más eficaces retardando los intercambios de humedad. Sin embargo, las películas de

hidrocoloides solubles en agua, se comportan pobres como barrera frente al paso del vapor de agua, debido a que son de naturaleza hidrófila, tienen afinidad por el agua, y permiten su paso, lo cual limita sus aplicaciones (Marzo-Rojas 2010).

Para la conservación de alimentos se deben utilizar películas que satisfagan de manera eficiente la permeación al vapor de agua entre el alimento y el medio ambiente; es decir, que acorde a los requerimientos de cada alimento, se apliquen los recubrimientos cuyo intercambio de vapor de agua sea adecuado para evitar el deterioro de los alimentos, principalmente frutos frescos (Domínguez-Martínez 2017).

## **2) Permeabilidad de gases**

La aplicación de las películas comestibles se debe en gran medida a las propiedades de barrera a gases que presenten, ya que estas pueden influir en diferentes procesos que pueden ocurrir en los alimentos (oxidación, cambios de textura por pérdida o ganancia de humedad, pérdida de aromas, entre otros), y por lo tanto incidir en su calidad final (Montalvo y col 2012).

Las propiedades de barrera a los gases de las películas comestibles, incluido el oxígeno, el dióxido de carbono, el etileno y los volátiles, son necesarios para retardar la respiración de los productos frescos y evitar el intercambio de compuestos de aroma y sabor de los alimentos con el medio ambiente. Sin embargo, la modificación de la atmósfera interna mediante el uso de recubrimientos comestibles puede desarrollar etanol y sabores alcohólicos como resultado de la fermentación anaeróbica asociada con un exceso de dióxido de carbono o concentraciones demasiado bajas de oxígeno (Lin y Zhao 2007).

La selección de un material de recubrimiento con la permeabilidad adecuada para diversos gases, es fundamental para modificar el entorno interno de los productos frescos con el fin de preservar los alimentos. Además, controlar la temperatura ambiental y la relativa humedad también es fundamental para modificar el entorno interno de los productos frescos, ya que la permeabilidad del recubrimiento y la respiración se ven afectados por estos parámetros (Lin y Zhao 2007).

En el caso de recubrimientos basados en hidrocoloides existe una permeabilidad selectiva a los gases, lo cual permite un intercambio gaseoso controlado, prolongando la vida útil del producto, al retrasar la maduración y la senescencia (Marzo-Rojas 2010).

### **3) Solubilidad en agua**

La solubilidad en agua se considera como un indicador de la resistencia de las películas comestibles en el agua, factor importante en el preembalaje de productos alimenticios debido a la alta actividad del agua y la posibilidad de contaminación en presencia de agua (Bourtoom y Chinnan 2008).

La solubilidad de la película es un factor importante que determina su biodegradabilidad cuando se utiliza como un medio para proteger los alimentos (Anchundia y col 2016). Además, determina las aplicaciones posibles de las películas. Las aplicaciones potenciales pueden requerir insolubilidad en el agua para mejorar la integridad del producto y la resistencia al agua. Sin embargo, en algunos casos la solubilidad en agua de la película antes del consumo del producto podría ser beneficiosa (Pérez-Gago y col 1999).

La solubilidad involucra la penetración de las moléculas de agua en la matriz polimérica, esto es seguido por la disrupción de las fuerzas de Van der Waals entre las cadenas poliméricas. Esta propiedad también está relacionada con las propiedades de barrera al vapor de agua, ya que entre mayores sean los valores de barrera menor será su solubilidad en agua (Aguilar-Méndez y col 2012).

Los materiales formadores de películas comestibles que son solubles en agua producen películas de solubilidad variada dependiendo de la fuente y de las condiciones de formación de la película y de los tratamientos efectuados. Por ejemplo, aislados de proteínas del suero nativo producen películas totalmente solubles en agua, pero soluciones de aislados de proteínas del suero desnaturalizadas térmicamente producen películas en las cuales las proteínas son mayormente insolubles (García y col 2009).

#### **4 Componentes de las películas comestibles**

Para la formación de una película o recubrimiento comestible se necesita en primer lugar de una solución que pueda constituir una matriz estructural con suficiente cohesión (Debeaufort y col 1998). Las películas y recubrimientos comestibles se preparan a partir de polímeros como hidrocoloides o lípidos y se hacen películas compuestas cuando se mezclan. Cuando se combinan lípidos, proteínas y polisacáridos que pueden interactuar física y/o químicamente, se pueden obtener recubrimientos con mejores propiedades. Sin embargo, la compatibilidad de los componentes es un punto importante a considerar cuando se trata de una mezcla de biopolímeros, ya que se puede alterar drásticamente el funcionamiento de los compuestos del recubrimiento (Diab y col 2001).

Además del componente de naturaleza polimérica y de alto peso molecular (matriz), otro componente importante de los recubrimientos comestibles son los plastificantes. Estos son moléculas de bajo peso molecular, baja volatilidad y con una naturaleza química similar al del polímero formador del recubrimiento. Se usan para mejorar la flexibilidad y la funcionalidad de los recubrimientos. Dentro de los agentes plastificantes utilizados más frecuentemente se encuentran: glicerol, polietilenglicol, sorbitol, aceites, ácidos grasos, ceras, entre otros (McHugh y Krochta 1994b).

Además de los plastificantes, se emplean antioxidantes, antimicrobianos, y reafirmantes de la textura con el fin de mejorar las propiedades de los recubrimientos. Se ha demostrado que algunos aditivos actúan más efectivamente en alimentos cuando son aplicados formando parte del recubrimiento comestible que cuando son aplicados en soluciones acuosas mediante dispersión o inmersión, ya que los recubrimientos pueden mantener los aditivos en la superficie del alimento por más tiempo (Baldwin y col 1999).

## **5 Materiales utilizados en la elaboración de películas y recubrimientos comestibles**

Se puede usar una variedad de polímeros en la formulación de recubrimientos comestibles, sin embargo, sus propiedades mecánicas y de barrera están intrínsecamente relacionadas con las características físicas y químicas de sus componentes. Los polímeros más comúnmente utilizados en la preparación de películas y recubrimientos comestibles son proteínas (gelatina, caseína, gluten de trigo y zeína), polisacáridos (almidón, pectina, celulosa, alginato y carragenano) y lípidos

(ácido esteárico, ceras y ésteres de ácidos grasos), que se puede usar solo o en combinaciones (Vargas y col 2008).

### **a Polisacáridos**

Los polisacáridos son utilizados en la industria de alimentos como gelificantes, espesantes estabilizantes, y formadores de películas comestibles, entre otras aplicaciones. Las películas obtenidas con polisacáridos son una opción atractiva porque estos compuestos son abundantes en la naturaleza y renovables, además provienen de diversas fuentes (Domínguez-Courtney y Jiménez-Munguía 2012). Se obtienen principalmente de vegetales, algas y microorganismos. Entre los polisacáridos obtenidos de vegetales están la celulosa y el almidón; los polisacáridos obtenidos de algas que más se utilizan son los alginatos, las carrageninas y el agar; mientras que los polisacáridos obtenidos de microorganismos incluyen la goma xantana, el dextrano y la goma gellan, entre otros (Khan y col 2007).

Los polisacáridos pueden ser lineales o ramificados y se componen de la repetición de un mismo monosacárido o varios. Asimismo, se pueden encontrar polisacáridos con carga neutra (agar, metilcelulosa), carga negativa (alginato de sodio, carragenano, pectina) o carga positiva (quitosano) en función de los grupos químicos unidos a los monosacáridos. Estas características estructurales determinan las diferencias entre un polímero y otro en cuanto a su solubilidad, propiedades gelificantes, emulsificantes, espesantes, sinergia o incompatibilidad entre polisacáridos o entre diferentes componentes, e incluso determinan sus propiedades formadoras de películas (López-de Lacey 2012).

Las características de las películas preparadas a partir de este tipo de materiales vienen determinadas también por la estructura del polisacárido, ya que influye el número de enlaces de hidrógeno intermoleculares establecidos entre las cadenas del polímero. El peso molecular del polisacárido también juega un papel importante en las propiedades finales de las películas. Los polímeros lineales de alto peso molecular y no iónico forman películas fuertes, como es el caso del agar y la metilcelulosa. En cambio, los polisacáridos más ramificados, con o sin carga aniónica, forman películas más débiles (Nieto 2009). En general, los polisacáridos forman películas con buenas propiedades mecánicas y de barrera al O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, pero no a la humedad debido a que son muy hidrofílicos (Kester y Fennema 1986). Para mejorar dichas condiciones es posible adicionar compuestos hidrofóbicos como ceras o aceites, y también se pueden realizar tratamientos para el entrecruzamiento de las moléculas (Campos y col 2011a).

Entre los polisacáridos estudiados, el almidón produce las películas con mejores características mecánicas (Domínguez-Courtney y Jiménez-Munguía 2012). Debido a su abundancia y bajo costo de producción, existe un gran interés en su utilización como componente de películas comestibles y recubrimientos biodegradables (Soliva y Martín 2001).

## **b Lípidos**

Los lípidos se caracterizan por ser hidrofóbicos y no poliméricos, presentando excelentes propiedades de barrera frente a la humedad, sin embargo, su falta de cohesividad e integridad estructural hace que presenten malas propiedades mecánicas formando recubrimientos quebradizos; sin embargo, reducen la

transpiración, la deshidratación, la abrasión en la manipulación posterior y pueden mejorar el brillo y apariencia de muchos de los alimentos (Kester y Fennema 1986).

Estos recubrimientos presentan algunas limitaciones tales como, propiedades mecánicas pobres y en ocasiones mala apariencia (García y col 2000). En consecuencia, deben estar asociados con agentes formadores de película, tales como proteínas o derivados de celulosa, ya que estas combinaciones proporcionan al recubrimiento mayor estabilidad (Debeaufort y col 1993).

Dentro del grupo de lípidos aplicados a recubrimientos y películas comestibles se pueden mencionar las ceras (abejas, candelilla y carnauba), resinas, monoglicéridos, diglicéridos y los ácidos grasos tales como el ácido esteárico, palmítico, láurico y oleico, entre otros (Kester y Fennema 1986). Las sustancias lipídicas más efectivas son la cera de parafina y la cera de abejas (Dhall 2013).

### **c Proteínas**

Los polímeros naturales como las proteínas, ofrecen una gran oportunidad para ser utilizados como materia prima en la elaboración de películas comestibles debido a su biodegradabilidad, y a que pueden suplementar el valor nutritivo de los alimentos (Bourtoom 2009). La capacidad de diferentes proteínas para formar recubrimientos depende de su peso molecular, conformaciones, propiedades eléctricas y estabilidad térmica (Campos y col 2011a).

La formación de una red macromolecular de proteína requiere de tres pasos: 1) ruptura de enlaces intermoleculares de baja energía que estabilicen a los polímeros en el estado nativo, 2) arreglo y orientación de las cadenas poliméricas, y 3) formación

de una red tridimensional que se establezca por la formación de nuevos enlaces (Cuq y col 1998). La probabilidad de formar enlaces intermoleculares depende de la forma de la proteína y de las condiciones utilizadas durante el proceso de elaboración (Tian y col 2011). Generalmente, las proteínas globulares deben ser desnaturadas por calentamiento, empleo de medios acuosos ácidos o básicos, o por solventes, con la intención de formar estructuras más extendidas que son requeridas para la formación de películas. Una vez extendida, las cadenas de proteínas pueden asociarse por uniones de hidrógeno, iónicas, hidrofóbicas y enlaces covalentes. La interacción entre cadenas produce una película cohesiva que es afectada por el grado de extensión de la cadena (estructura de la proteína), así como por la naturaleza y secuencia de los residuos de aminoácidos. La distribución uniforme de grupos polares, hidrofóbicos, y/o grupos tioles a lo largo del polímero incrementa la probabilidad de las interacciones (Krochta 1997).

Las películas comestibles basadas en proteínas presentan excelentes propiedades de barrera a los gases en comparación con las preparadas a partir de lípidos y polisacáridos. Las propiedades mecánicas de las películas comestibles basadas en proteínas también son mejores que las de las películas basadas en polisacáridos y lípidos, debido a que las proteínas tienen una estructura única (basada en 20 monómeros diferentes) que confiere un rango más amplio de propiedades funcionales. Sin embargo, estas películas presentan escasa resistencia al vapor de agua y menor resistencia mecánica en comparación con los polímeros sintéticos (Bourtoom 2009).

Otros factores que pueden influir en las propiedades que presentan este tipo de películas son el valor de pH de la solución de proteína, el uso de plastificantes, las

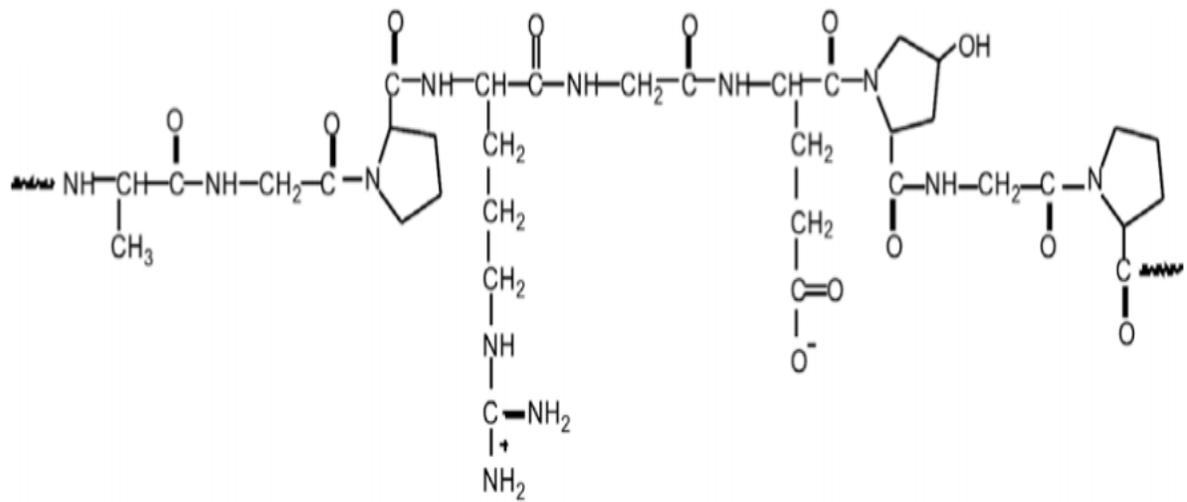
condiciones de formación y las sustancias incorporadas a la solución formadora de la película. Varios tipos de proteínas han sido utilizadas para la formación de películas comestibles, entre ellas se encuentran gelatina, caseína, proteína de suero, gluten de trigo y proteínas de soya, por mencionar algunas, todas ellas con propiedades funcionales particulares principalmente por el origen diverso de la matriz proteica utilizada (Montalvo y col 2012).

## **B GELATINA**

### **1 Estructura y composición**

La gelatina es un compuesto de proteína soluble obtenido por hidrólisis parcial de colágeno, el principal constituyente de proteína fibrosa en huesos, cartílagos y pieles; por lo tanto, la fuente, la edad del animal y el tipo de colágeno son todos factores intrínsecos que influyen en las propiedades de las gelatinas (Johnston-Banks 1990).

La estructura del colágeno se rompe irreversiblemente, al obtenerse la gelatina. Por consiguiente, el proceso de manufactura involucra la destrucción de la estructura terciaria, secundaria y en alguna medida también de la estructura primaria del colágeno nativo (Ledward 1986). En efecto tres tipos predominantes de cadenas se pueden encontrar después de la degradación tropo-colagénica: la cadena alfa, compuesta por una sola cadena peptídica, la cadena beta, formada por dos cadenas peptídicas conectadas y la gamma que resulta del vínculo entre las tres cadenas. Debido a la presencia de las mismas y sus fragmentos intermedios, una muestra de gelatina comercial tiene una amplia distribución de pesos moleculares (Normand y col 2000). En la **Figura 2** se muestra la estructura química de la gelatina.



**Figura 2.** Estructura química de la gelatina.

Fuente: Peña y col 2010.

La gelatina está compuesta de una secuencia única de aminoácidos; se caracteriza por un alto contenido de glicina, prolina e hidroxiprolina. La gelatina también tiene una mezcla de cadenas simples y dobles desplegadas de carácter hidrofílico (Bourtoom 2008). La estructura primaria de la gelatina se asemeja mucho al colágeno original. Las pequeñas diferencias se deben a las fuentes de materia prima junto con procedimientos de pretratamiento y extracción (Johnston-Banks 1990). Se pueden obtener dos tipos de gelatina, dependiendo del procedimiento de pretratamiento, y se conocen comercialmente como gelatina tipo A (punto isoeléctrico  $\approx$  pH 8-9) y gelatina tipo B (punto isoeléctrico a pH  $\approx$  4-5) obtenidas bajo ácido y condiciones de pretratamiento alcalino respectivamente. Las uno u otro tipo de gelatina, dependiendo del grado de reticulación del colágeno en la materia prima (Gómez-Guillén y col 2011).

La gelatina posee propiedades características, forma una solución de elevada viscosidad en agua y produce un gel cuando esta solución se enfría. Así mismo, estas macromoléculas en solución se comportan como polianfolitos debido a la composición de aminoácidos básicos y ácidos (Dobrynin y col 2004). En general, el estado conformacional de las cadenas de gelatina es altamente dependiente del medio fisicoquímico en el que se encuentran disueltas, teniendo en cuenta que estas moléculas tienden a estabilizarse mediante diferentes tipos de fuerzas inter e intramoleculares, en las que intervienen principalmente los enlaces del tipo puente de hidrógeno (Olivares 2007). La calidad de la gelatina para una aplicación particular depende en gran medida de sus propiedades reológicas (Stainsby 1987). Además de las propiedades fisicoquímicas básicas, como los parámetros de composición, solubilidad, transparencia, color, olor y sabor, los atributos principales que mejor

definen la su calidad comercial son la resistencia del gel y la estabilidad térmica (temperaturas de gelificación y fusión). Para propósitos de estandarización, la medición de la resistencia del gel se determina utilizando la llamada prueba Bloom, que consiste en realizar un protocolo bien definido a una concentración de gelatina dada (6.67%), temperatura (10°C) y tiempo de maduración (17 horas); la fuerza del gel debe expresarse en "grados Bloom" normalizado (Wainwright 1977).

Tanto la resistencia del gel como la termoestabilidad dependen en gran medida de las propiedades moleculares de la gelatina, especialmente con respecto a la composición de aminoácidos, que es específica de la especie y la distribución del peso molecular, que resulta principalmente a partir de las condiciones de procesamiento. El contenido de prolina e hidroxiprolina es particularmente importante para el efecto gelificante (Gómez-Guillén y col 2011). Se ha informado que la estabilidad de la triple estructura helicoidal en gelatinas renaturalizadas es proporcional al contenido total en iminoácidos de pirrolidina, dado que son las zonas ricas en prolina e hidroxiprolina, ya que éstas moléculas tienen más probabilidades de estar involucradas en la formación de zonas de nucleación (Ledward 1986).

## **2 Cambios estructurales de la gelatina en tratamientos térmicos**

La temperatura influye fuertemente en una amplia variedad de fenómenos de solución de proteínas (Schellman 1987). El calentamiento de la gelatina provoca la desnaturalización y separación de las tres hélices, que la configuran al romperse los enlaces intracadena por puentes de hidrógeno (Dai y col 2006). Cuando la solución se

enfriamiento se promueve la agregación parcial de moléculas de gelatina y se produce el fenómeno de gelificación (Ross-Murphy 1998).

Aproximadamente a 40 °C, las soluciones acuosas de gelatina están en estado sólido y forman geles físicos termorreversibles en el enfriamiento. Durante la gelificación, las cadenas experimentan una transición de orden conformacional y tienden a recuperar la estructura de triple hélice del colágeno (Ross-Murphy 1992), formándose una extensa red cooperativa de enlaces del tipo puente de hidrogeno (Schellman 1987). Los grados Bloom de la gelatina tiene una relación directa con el nivel de renaturalización alcanzado durante la gelificación, que afecta a las propiedades mecánicas y se relaciona también con los valores de entalpia de desnaturalización, que aumenta con el incremento del índice de grados Bloom (Dai y col 2006). Existe una relación directa entre el contenido de triples hélices y el índice de grados Bloom, lo cual se encuentra relacionado con el proceso de renaturalización (Ross-Murphy 1992).

Los geles de gelatina existen en un pequeño rango de temperatura y las propiedades mecánicas son muy sensibles a las variaciones térmicas, y aún a temperatura constante dependen del tiempo y de la historia térmica previa (Olivares 2007). La formación de films de gelatina implica una primera etapa de gelificación y el posterior secado del gel. Por tanto, durante la formación de films de gelatina se producen cambios del mismo tipo más la progresiva agregación de cadenas a medida que se pierde agua. La gelatina es un biopolímero muy estudiado debido al amplio rango de aplicaciones que posee en la industria (Karim y Bhat 2008).

### **3 Aplicaciones industriales de la gelatina**

Los usos de la gelatina se pueden clasificar de acuerdo con su funcionalidad. Las funcionalidades específicas incluyen gelificación, estabilización, emulsificación, adhesividad y sedimentación (clarificación) (Baziwane y He 2003). La gelatina se ha utilizado durante mucho tiempo en la industria alimentaria como agente de clarificación, estabilizador y material de recubrimiento protector. Se ha informado que toneladas de gelatina se usan anualmente en la industria alimentaria, especialmente en postres, dulces, productos de panadería, carne en gelatina, helado y productos lácteos. La cantidad de gelatina que encuentra su aplicación en la industria farmacéutica, no es despreciable en lo que respecta a la fabricación de cápsulas farmacéuticas, ungüentos, cosméticos, recubrimiento de comprimidos y emulsiones. La gelatina también encuentra aplicación en la fotografía y en algunas industrias especializadas (Djagny y col 2001).

Actualmente, la gelatina es ampliamente utilizada en la fabricación de películas comestibles con excelente capacidad de formación de película y propiedad de barrera a los gases, bajo punto de fusión, abundancia y biodegradabilidad (Gómez-Guillén y col 2009).

#### **a Películas comestibles a base de gelatina**

La gelatina representa una alternativa viable como material formador de películas debido a su abundancia, bajo costo y disponibilidad (Aguilar-Méndez y col 2012). Las propiedades físicas y estructurales de la gelatina están influenciadas principalmente por la distribución del peso molecular y la composición de aminoácidos que

desempeña un papel vital en las propiedades reológicas y de barrera de las películas resultantes (Gómez-Guillén y col 2009).

La capacidad de formación de película de la proteína puede verse influida por la composición, distribución y polaridad de los aminoácidos, enlaces cruzados iónicos entre grupos amino y carboxilo, puentes de hidrógeno y enlaces disulfuro intramoleculares e intermoleculares (Gennadios y Weller 1991). La interconexión de moléculas de proteínas durante el proceso de secado conduce a la formación de la matriz de la película. Por lo tanto, la extensión o el despliegue de la molécula de proteína, podría favorecer la interacción entre las moléculas, en la que las zonas de unión podrían formarse a un alto nivel. El despliegue de proteínas por tratamiento térmico es, por lo tanto, un enfoque prometedor para mejorar la capacidad de formación de película (Choi y Han 2002).

Las propiedades de las películas varían en función de la procedencia de la gelatina, puesto que la composición de aminoácidos de gelatinas de distintas especies es diferente, especialmente en lo que respecta a los aminoácidos mayoritarios de la gelatina (glicina, prolina e hidroxiprolina) (Gómez-Guillén y col 2011).

Las películas o recubrimientos basados en gelatinas se han diseñado para recubrir los alimentos con el fin de reducir el transporte de agua, oxígeno y grasas principalmente en productos cárnicos (McHugh y col 1994). Si bien este tipo de películas presentan buenas propiedades de barrera a los gases (oxígeno y al dióxido de carbono), sus valores de permeabilidad al vapor de agua suelen ser altos debido a que la gelatina es altamente hidrofílica (Arvanitoyannis 2002), al igual que la mayoría de las proteínas y otros hidrocoloides.

Jongjareonrak y col (2006) elaboraron películas comestibles a partir de gelatina de origen marino, ellos reportan que las películas con mayor contenido de proteína presentaron mayor espesor y mejores propiedades mecánicas pero menor permeabilidad al vapor de agua que aquellas con menor contenido de proteína. Por su parte, Cao y col (2007b) investigaron las propiedades mecánicas, de hinchamiento y ópticas de películas preparadas a partir de aislado de proteína de soya y gelatina; encontrando que, con el aumento de la proporción de gelatina en las películas, aumentó la resistencia a la tracción, el alargamiento a la rotura, el módulo elástico y la propiedad de hinchamiento de las películas; además, obtuvieron películas más transparentes y fáciles de manejar. Por otro lado, Fakhouri y col (2017) evaluaron las propiedades de películas elaboradas a partir de gelatina de piel de sepia, incorporada con extractos de canela, clavo de olor y anís estrellado. Estos autores obtuvieron un aumento en la permeabilidad al vapor de agua con proporciones crecientes de gelatina, mientras que el alargamiento a la rotura de las películas disminuyó al aumentar el contenido de gelatina. Debido a las deficiencias que pueden presentar las películas comestibles elaboradas a partir de gelatina, se recurre a su combinación con otros biopolímeros para mejorar sus propiedades mecánicas y sobre todo, de barrera.

## **C ALMIDÓN**

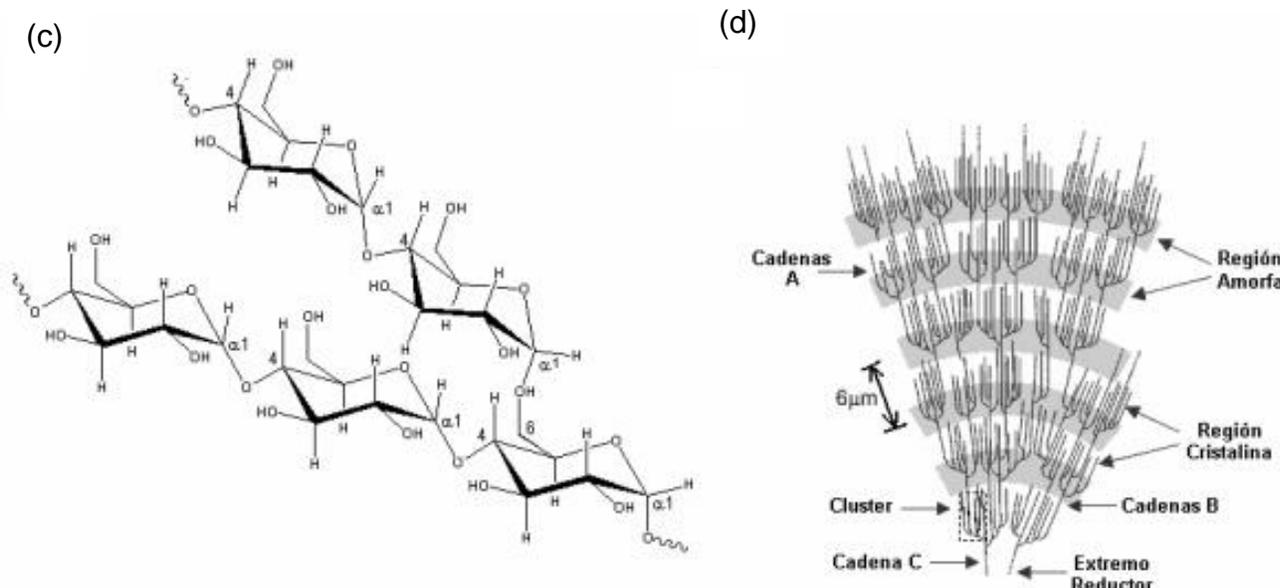
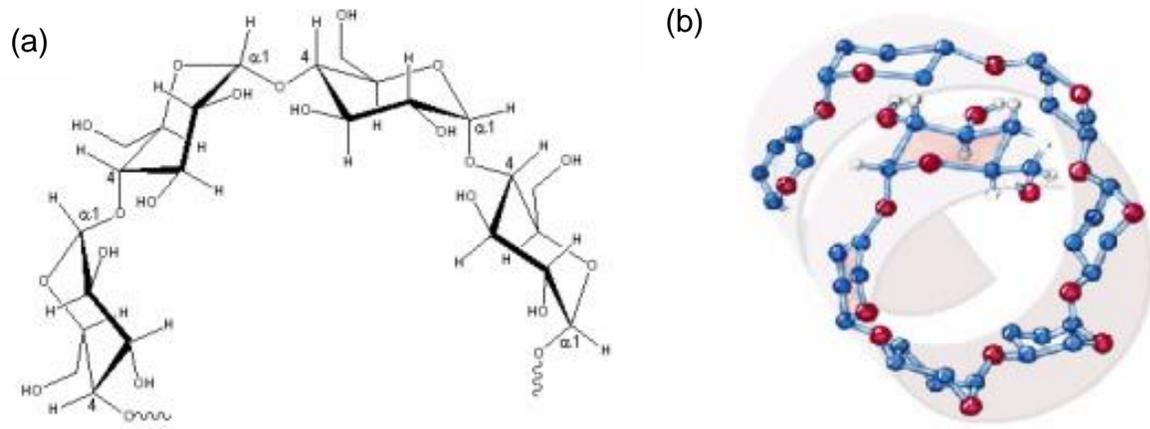
### **1 Estructura y composición**

En una variedad de tejidos de origen botánico, incluyendo los frutos, semillas, hojas y tubérculos, se encuentra el almidón. Este posee la característica de ser la reserva de carbohidratos de las plantas, es insoluble en agua fría y generalmente está depositado como diminutos gránulos de tamaño entre 1 a 100 micrómetros y con la

posibilidad de tener mayores diámetros. Las diferentes características del almidón, no sólo la morfología y el tamaño del gránulo, sino también la calidad y la composición que posee, están muy relacionadas con la procedencia de la fuente vegetal de la cual se obtiene y a su vez puede variar las características entre la misma especie (Peñaranda-Contreras y col 2008).

El almidón está constituido principalmente por polímeros de  $\alpha$ -D glucosa, azúcar de seis carbonos, que en forma anillada se le conoce como D-glucopiranososa, ésta se une mediante enlaces glucosídicos, principalmente en presencia de agua. Al condensarse una molécula de agua se forma un enlace de puente de hidrogeno, esta condensación sucede principalmente entre los carbonos 1 y 4 o puede ocurrir en los carbonos 1 y 6, estos enlaces tienen configuración  $\alpha$ , lo cual propicia la formación de estructuras helicoidales (Buléon y col 1998). El almidón está conformado esencialmente por una mezcla de polisacáridos conformada por amilosa y amilopectina, y una fracción minoritaria (de 1% a 2%) de conformación no glucosídica (French 1984).

La mayoría de los almidones en su estructura glucosídica está conformada por 20% de amilosa, y el restante 80% de amilopectina. La amilosa es esencialmente un polímero, en el cual las unidades de anhidroglucosas están presentes y unidas en mayor parte por enlaces glucosídicos  $\alpha$  (1-4) y un leve grado de ramificación en enlaces  $\alpha$  (1-6) (**Figura 3a**). La molécula tiene un peso molecular promedio de 105 a 106 g/mol (Tester y col 2004) y por la presencia de grupos hidroxilos ofrece propiedades hidrofílicas al polímero. La conformación de la amilosa es helicoidal tridimensional (**Figura 3b**) en cada vuelta de la hélice hay seis unidades de



**Figura 3.** Componentes básicos del almidón: (a) Amilosa; (b) conformación helicoidal de la amilosa; (c) amilopectina; (d) estructura molecular de la amilopectina.

Fuente: Guerra-Della Valle 2007.

anhidroglucosa. El interior de la hélice es lipofílico, mientras que el exterior es hidrofílico, permitiendo la formación de complejos con otros compuestos (Fredriksson y col 1998). Este polímero, también tiene la capacidad de formar geles; un gel se forma al calentar el almidón en agua. El almidón se solubiliza y la amilosa se reasocia formando una red tridimensional (Guerra-Della Valle 2007).

La otra fracción del almidón es la amilopectina, que son moléculas más grandes que la amilosa y contienen enlaces glucosídicos  $\alpha$  (1-4) y  $\alpha$  (1-6) y ramificaciones que dan a su forma molecular semejanza a un árbol (**Figura 3c**) (Peñaranda-Contreras y col 2008). La macromolécula posee un peso molecular comprendido de 107 a 108 g/mol (Tester y col 2004). La organización básica de la amilopectina puede explicarse en tres tipos de cadenas (**Figura 3d**): cadenas cortas (A), con grado de polimerización 14–18, enlazadas a través de un extremo reductor; cadenas largas (B) con grado de polimerización 45–55, se enlaza con una o varias cadenas A o B en grupos hidroxilos primarios; y un extremo reductor (C). Las cadenas A y B forman racimos asociados, responsables de las regiones cristalinas (clúster) y las áreas amorfas contienen enlaces  $\alpha$  (1,6) presentándose en intervalos de 0.6–0.7 nm (Myers y col 2000).

La funcionalidad y propiedades del almidón, como la resistencia mecánica y la flexibilidad, relacionadas con el carácter de la región cristalina, dependen de la relación entre la amilosa y la amilopectina del grado de ramificación y de la distribución del peso molecular (Peñaranda-Contreras y col 2008).

## **2 Cambios estructurales del almidón en tratamientos térmicos**

Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría, los cambios que experimenta el almidón comienzan al aplicar calor a una suspensión. La gelatinización es el término usado para describir eventos moleculares asociados con el calentamiento de almidón en agua, el cual cambia de una forma semicristalina (la cual no es digerible), a una forma eventualmente amorfa (digerible) (Tester y Debon 2000).

En condiciones de exceso de agua, los puentes de hidrógeno de la región amorfa del granulo se rompen permitiendo que el agua se asocie con los grupos hidroxilos libres. Esto está definido por la movilidad de las cadenas de los polímeros por encima del valor de la temperatura de transición vítrea, ocurriendo el cambio de estado vítreo a gomoso. Este cambio a su vez, facilita la movilidad molecular en las regiones amorfas, siendo un proceso reversible y permitiendo el hinchamiento del grano. El gránulo se expande al mismo tiempo que los polímeros se hidratan. Posteriormente se produce una transición molecular irreversible, la disociación de las dobles hélices propias de la región cristalina (Camire y col 1990).

La retrogradación se puede ver como el fenómeno opuesto a la gelatinización, los polímeros solubles del almidón y los fragmentos insolubles se reasocian después del calentamiento. Eventualmente se forman cristales, acompañados por un incremento gradual en la rigidez y la separación de fases entre el polímero y el solvente (sinéresis). La retrogradación del almidón ocurre en dos procesos: rápida gelación de la amilosa por la formación de segmentos de dobles hélices y lenta recristalización de cadenas cortas de amilopectina. La aparición de cristales influye en la textura, digestibilidad y

aceptación de los productos con base en almidón por parte del consumidor (Sandoval-Aldana y col 2005).

### **3 Aplicaciones industriales del almidón**

El almidón es el segundo componente en orden de abundancia en la naturaleza después de la celulosa y tiene aplicaciones en diversas industrias (alimenticia, farmacéutica, textil y papelera). Los almidones constituyen, a su vez, un componente mayoritario en el consumo humano, aportando entre el 75 y 80% del consumo energético total (López 2011).

Dentro de las posibles aplicaciones del almidón en la industria alimenticia podemos mencionar los siguientes: ligante, estabilizante de espumas, gelificante, glaseante, humectante, estabilizante, texturizante y espesante. Recientemente, el uso del almidón ha sido de gran impacto para el entorno ecológico (Larotonda y col 2004), en la elaboración de plásticos biodegradables para productos como bolsas, espumas y otros empaques para alimentos (Funke y col 1998). Los almidones nativos y modificados han recibido considerable atención para la formulación de películas biodegradables debido a su naturaleza completamente biodegradable, característica comestible, capacidad formadora de películas y bajo costo (Versino y col 2016).

#### **a Películas a base de almidón**

Debido a su abundancia y bajo costo de producción, existe un gran interés en la utilización de almidón como componente de películas comestibles y recubrimientos biodegradables. Las películas elaboradas a partir de este carbohidrato son claras, flexibles, transparentes y presentan excelentes barreras al oxígeno (Soliva y Martín

2001). Sin embargo, sus propiedades de barrera contra la humedad, no son tan buenas (Krochta y De Mulder-Johnston 1997). El carácter hidrofílico de estas películas les confiere un aspecto quebradizo causado por las altas fuerzas intermoleculares. Los plastificantes como glicerol, sorbitol, polietilenglicol, aumentan la flexibilidad de las películas debido a su capacidad para reducir los enlaces de hidrógeno internos entre las cadenas de los polímeros mientras aumentan el espacio molecular. Los plastificantes más usados en las películas de almidón son el sorbitol y el glicerol (Mali y col 2005).

Según García y col (1998), la amilosa es la responsable de la capacidad formadora de película que tienen los almidones. La preponderancia de la amilosa (>70%) en almidones de amilomaíz otorga mayor fuerza y más flexibilidad a películas elaboradas con este tipo de materiales. La estructura ramificada de la amilopectina generalmente conlleva a películas con pobres propiedades mecánicas, es decir, la fuerza de tensión y elongación son bajas (Tharanathan 2003).

Las películas de almidón se usan principalmente para disminuir el intercambio gaseoso entre el medio ambiente y el alimento, más que retardar la pérdida de humedad debido a sus características hidrofílicas (Krochta y Mulder-Johnston 1997). Parra y col (2004) obtuvieron películas de almidón de yuca con buenas propiedades de flexibilidad y permeabilidad al vapor de agua. Por su parte, Tapia-Blácido y col (2005) elaboraron películas con harina de amaranto, las cuales presentaron buena flexibilidad y poca resistencia a la tensión. Sin embargo, sus permeabilidades al agua y al oxígeno fueron menores que aquellas presentadas en películas de otros polisacáridos y proteínas. Por otro lado, Motedayen (2013) prepararon películas

comestibles mezclando kefirán con almidón de maíz; investigaron los efectos de la adición de almidón en las propiedades físicas, mecánicas y de permeabilidad al vapor de agua de las películas resultantes; encontrando que a altas concentraciones del polisacárido se obtienen películas con bajas propiedades mecánicas y altas propiedades de barrera.

La naturaleza hidrofílica del almidón es la principal desventaja que limita el desarrollo de estos materiales, ya que muchas de sus propiedades dependen de la humedad del ambiente (Shogren y col 1993). Una alternativa para reducir estos inconvenientes es el uso de almidones modificados (Lafargue y col 2007).

#### **4 Almidones modificados**

Los almidones en estado nativo, tienen propiedades físicas, químicas y funcionales que son aprovechadas por la industria para necesidades específicas. Sin embargo, estos almidones carecen de versatilidad para tolerar las condiciones de procesamiento, el manejo durante la distribución y almacenamiento (Slattery y col 2000). Debido a las limitaciones de los almidones en cuanto a propiedades mecánicas y químicas, y a su alta degradación, se realizan modificaciones, que pueden realizarse por tres métodos: reacciones de cambios de tipo físico, químico y microbiano, o por una combinación entre estas (Peñaranda-Contreras y col 2008).

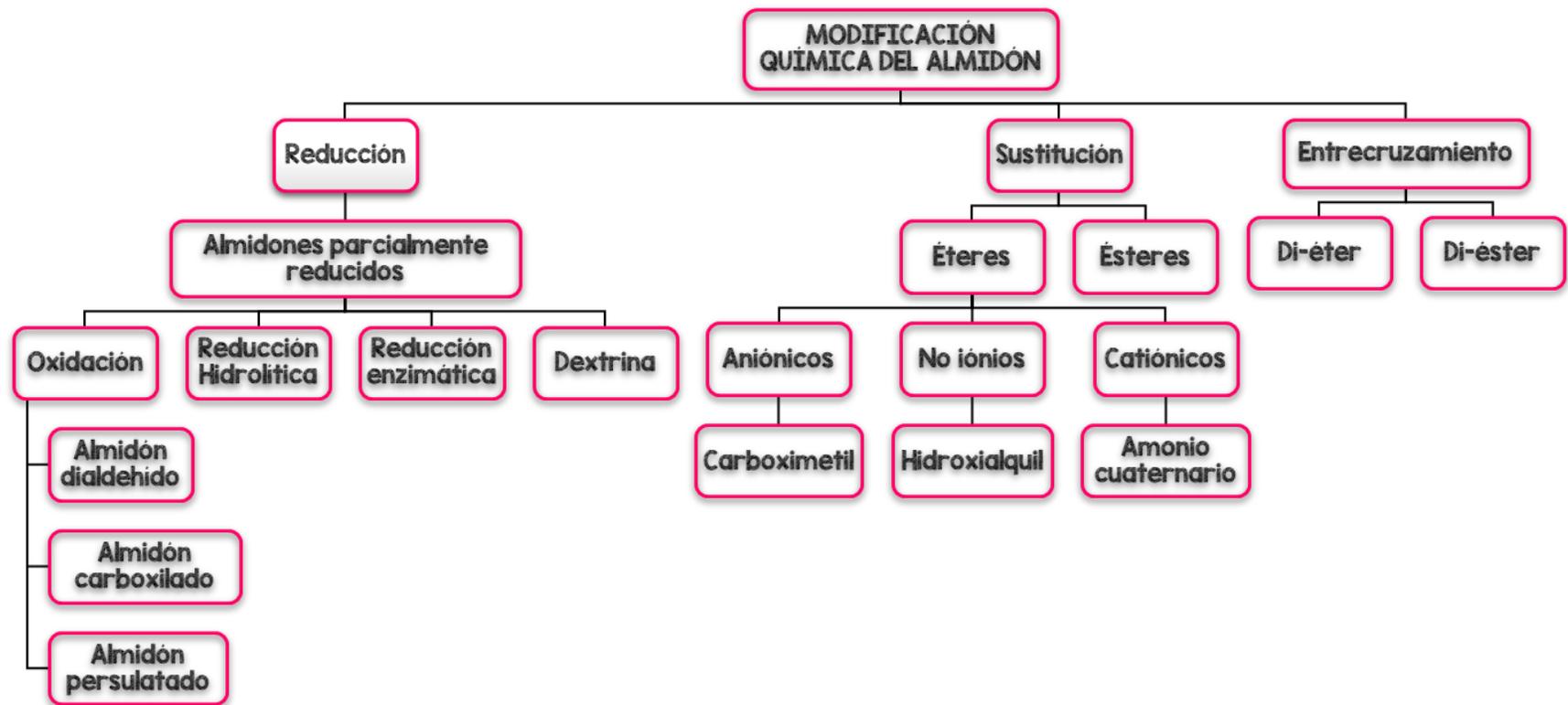
Los métodos físicos utilizan calor y humedad (pregelatinización); mientras que los métodos químicos involucran la introducción de grupos funcionales dentro de las moléculas constituyentes del almidón mediante reacciones de derivatización (eterificación, esterificación, entrecruzamiento) o reacciones de descomposición

(hidrólisis ácida o enzimática y oxidación). La derivatización química ha sido ampliamente estudiada para producir materiales con baja sensibilidad a la humedad (Fringant y col 1998).

Se ha denominado almidón modificado al almidón que ha sufrido una alteración en sus características físicas o químicas con la finalidad de mejorar sus propiedades funcionales (Singh y col 2007). Las películas de almidón modificado han ganado atención académica e industrial porque son biodegradables, tienen un bajo costo y poseen una buena solubilidad y propiedades mecánicas mejoradas (Sha y col 2016).

#### **a Modificación química**

El almidón se usa ampliamente en la producción de productos alimenticios e industriales por lo que a menudo se requiere la modificación química para adecuar mejor sus propiedades a aplicaciones específicas. La modificación química del almidón está directamente relacionada con las reacciones de los grupos hidroxilo del polímero de almidón. Reacciones vía éter, formación de ésteres, oxidación y la hidrólisis de los grupos hidroxilos, son algunas modificaciones químicas aplicables al almidón (**Figura 4**). El grado de sustitución está relacionado con la modificación química e indica el promedio del número de sustituciones por unidad de anhidroglucosa en el almidón. El máximo grado de sustitución es 3 debido a que se presentan tres grupos hidroxilo disponibles por unidad de anhidroglucosa (Miladinov y Hanna 2000). En general la esterificación de los polisacáridos con ácidos orgánicos y derivados del ácido es una de las transformaciones más versátiles de estos biopolímeros. La introducción de un grupo éster en el polisacárido constituye un desarrollo importante debido a que permitirá modificar la naturaleza hidrofílica y obtener cambios significativos en las



**Figura 4.** Modificación química del almidón.

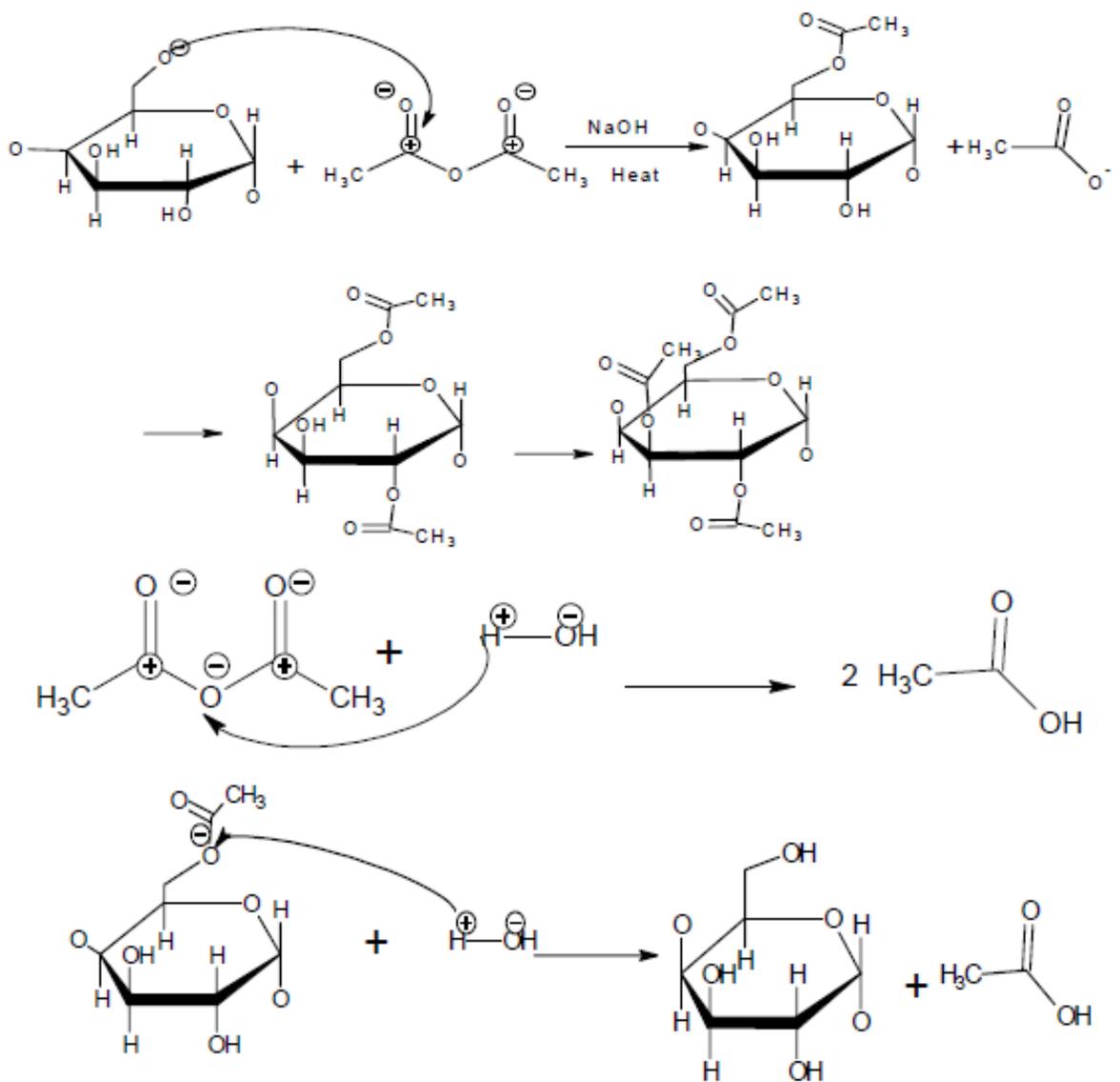
Fuente: Peñaranda-Contreras y col 2008.

propiedades mecánicas y térmicas. Los ésteres de almidón generalmente se preparan por la reacción del almidón con donadores de acilo anhídridos o la reacción con acilos clorados y en presencia de solventes orgánicos (Peñaranda-Contreras y col 2008). De diversas modificaciones químicas, la acetilación del almidón se puede realizar con relativa facilidad para mejorar significativamente las propiedades fisicoquímicas y funcionales del almidón, incluso con un bajo grado de sustitución (Moorthy 1985).

### 1) Modificación química por acetilación

La acetilación es una modificación química del almidón por esterificación, en la cual se sustituyen los grupos hidroxilos (OH) del almidón por grupos acetilos ( $\text{CH}_3\text{-C=O}$ ) que le brindan mayor estabilidad, variando las propiedades fisicoquímicas y funcionales (Prieto-Méndez y col 2010). Las reacciones que ocurren durante la acetilación son ilustradas en la **Figura 5**; en la reacción principal, el almidón es acetilado con anhídrido acético y con una base como catalizador. Esta reacción es un ejemplo de una sustitución nucleofílica en un carbono insaturado del anhídrido acético (Guerra-Della Valle 2007).

Durante la acetilación, tres grupos hidroxilo libres en  $\text{C}_2$ ,  $\text{C}_3$  y  $\text{C}_6$  de la molécula de almidón pueden sustituirse con grupos acetilo. Por lo tanto, el grado de sustitución máximo teórico es 3 (Xu y col 2004). La sustitución tiene lugar mediante un mecanismo de adición y eliminación; además, los grupos OH libres de la unidad de anhidroglucosa tienen diferente reactividad. El grupo OH primario situado en el  $\text{C}_6$  es más reactivo, ya que se localiza en el exterior de la molécula, teniendo mayor contacto con el anhídrido acético y acetilándose con mayor facilidad que los grupos OH en posiciones secundarias  $\text{C}_2$  y  $\text{C}_3$  que se encuentran localizados en el interior de la molécula,



**Figura 5.** Reacciones químicas durante la acetilación.

Fuente: Xu y col 2004.

formando puentes de hidrógeno con las unidades de anhidroglucosa cercanas (Guerra-Della Valle 2007). De los grupos secundarios, el grupo OH en el C<sub>2</sub> es más reactivo que el del C<sub>3</sub>, principalmente porque el primero es más cercano al hemiacetal y más ácido que el posterior. La acetilación de los almidones depende de ciertos factores, como la fuente de obtención del almidón, concentración del reactivo, tiempo de reacción y pH (Xu y col 2004).

Después de la esterificación, las propiedades de los ésteres de almidón cambian, y estos cambios dependen en gran medida del grado de sustitución y la longitud de la cadena de carbono de los grupos reemplazados (Shogren y col 1996). La hidrofobicidad del almidón aumenta al aumentar la longitud de la cadena carbonada y el grado de sustitución, lo que aumenta aún más la miscibilidad del almidón con otros polímeros hidrofóbicos (Zhang y col 1997).

Los almidones acetilados poseen diferentes características a los nativos; presentan 6-10 ° C menos en la temperatura de gelatinización y el pico de viscosidad máxima es mayor con respecto al nativo, lo cual indica que los almidones acetilados se dispersan más fácilmente que los nativos. La acetilación también incrementa la claridad y estabilidad de los geles que se forman con este almidón y reduce la retrogradación (Prieto-Méndez y col 2010).

En la industria, este tipo de almidón es útil principalmente en los productos para refrigerar y congelar, ya que la acetilación disminuye la sinéresis, también son usados como espesantes debido a que al aumentar la viscosidad del almidón, imparten textura, estabilidad y claridad. Es utilizado a su vez en la fabricación de tela y papel; se puede combinar con resinas para dar dureza a los materiales. También se ha

reportado su uso para la fabricación de películas biodegradables, materiales termoplásticos y como sustituto de celulosa acetilada (Xu y col 2004).

El acetato de almidón con grados de sustitución 0.01-0.2 está aprobado por la FDA para uso alimentario, para mejorar la unión, el espesamiento, la estabilidad y la texturización (de Graaf y col 1998). Por otro lado, los almidones con alto grado de sustitución han sido utilizados como termoplásticos, sustitutos de acetato de celulosa (Xu y col 2004).

#### **a) Acetilación por extrusión reactiva**

Tradicionalmente, los ésteres de almidón con bajos grados de sustitución se han preparado en medios acuosos por métodos discontinuos (Miladinov y Hanna 2000). Los métodos convencionales de modificación de almidón, requieren una cantidad excesiva de reactivos y pueden causar contaminación ambiental por químicos sin reaccionar (Landerito y Wang 2005). La tecnología de extrusión es un proceso de alta temperatura y corto tiempo, con la ventaja de alta versatilidad y ausencia de efluentes (Mali y Grossmann 2001) que puede superar estos problemas utilizando cantidades reducidas de reactivos. Durante la extrusión, el almidón es calentado, transportado y comprimido por uno o dos tornillos y presionado hacia una matriz a alta temperatura y presión resultando en cambios moleculares (Murúa-Pagola y col 2009).

El uso de un extrusor como reactor químico permite manejar polímeros de alta viscosidad en ausencia de disolventes. También ofrece una gran flexibilidad operativa, como resultado de la amplia gama de condiciones de procesamiento en presión y temperatura (0-500 bar y 70-500 °C), la posibilidad de inyección múltiple y el tiempo

de residencia controlado (distribución) y el grado de mezcla (Xie y col 2006). Las ventajas de la extrusión incluyen construcción simple, operación fácil, bajo costo de tratamiento de la muestra, producción en masa y propiedades físicas uniformes (Watano y col 2002). Las reacciones se llevan a cabo de manera continua y rápida en el extrusor; los extrusores pueden manejar líquidos viscosos, y la gelificación del almidón no es un problema. El almidón se plastifica en el extrusor con cantidades muy pequeñas de agua (16-20%), lo que reduce los requisitos de secado posteriores. Aunque la extrusión no se utiliza ampliamente para modificaciones de almidón, tiene un gran potencial (Miladinov y Hanna 2000).

## **D EXTRUSIÓN**

### **1 Fundamentos teóricos**

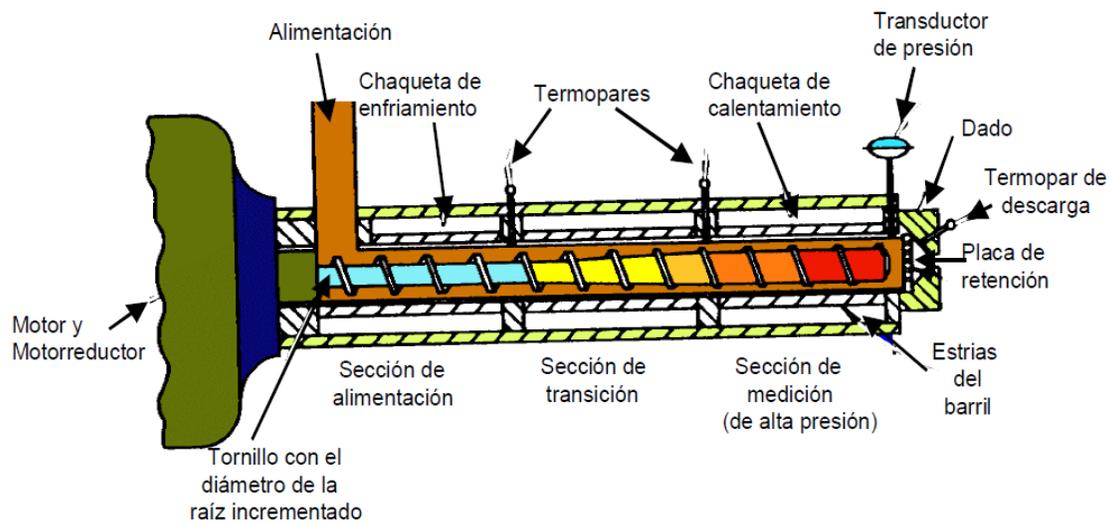
La extrusión es una de las técnicas actuales más importantes de procesamiento de polímeros (Hernández-Izquierdo y Krochta 2008). La extrusión puede definirse como la acción de forzar, por medio de presión, a pasar a través de un dado o boquilla un material fundido en donde las condiciones de proceso son controladas (Dziezak 1989).

El principio fundamental del proceso de extrusión es el de convertir el material sólido en un fluido mediante la aplicación de calor y trabajo mecánico, promoviendo, así, la termoplastificación del mismo. La extrusión es un proceso extremadamente versátil y el equipo puede comportarse como: a) un intercambiador de calor, debido a las chaquetas de calentamiento y/o enfriamiento que envuelven las paredes del cañón; b) reactor químico de procesamiento de diversos materiales, como polímeros y

alimentos en condiciones de altas temperaturas (hasta de 250°C), altas presiones (hasta de 25 MPa), y cortos tiempos de residencia (1 a 2 min). En esas condiciones de procesamiento puede producirse una abertura de las diversas estructuras terciarias y cuaternarias de los biopolímeros, resultando en el rompimiento y rearreglo de los puentes de hidrógeno y disulfuro, permitiendo la plastificación y la formación de las texturas deseadas (Olkku y Linko 1977).

El extrusor combina varias operaciones unitarias, mezclado, amasado, cocinado, formado, enfriado y/o cortado. La combinación de estas operaciones es posible gracias a la gran cantidad de variables tales como velocidad de alimentación, humedad, velocidad del tornillo, temperatura del barril, perfil del tornillo y la configuración de la boquilla (González y col 2002). Los componentes principales de un extrusor se muestran en la **Figura 6**.

Los extrusores ofrecen significativas ventajas, como son una minimización del tiempo, energía y costos, una producción continua en gran escala, alta capacidad de producción por unidad de área, y ausencia de efluentes (Stanley 1986). La extrusión, como proceso de varios pasos, multifuncional y térmico-mecánico, ha permitido un gran número de aplicaciones de alimentos (Altan y col 2008). Las aplicaciones más comunes de los extrusores son la producción de botanas expandidas, cereales instantáneos, bases para sopas y bebidas, alimentos infantiles, proteínas vegetales texturizadas y productos de confitería. El proceso de extrusión da como resultado una serie de cambios químicos, que incluyen la gelatinización de moléculas de almidón, la reticulación de proteínas y la generación de sabores. Recientemente han sido usados como reactores químicos para producir almidones modificados (Martínez-Ortiz 2007).



**Figura 6.** Principales componentes de un extrusor de tornillo simple.

Fuente: Aguilar-Palazuelos 2007.

Aunque la extrusión no se usa ampliamente para modificaciones de almidón, tiene un gran potencial (Miladinov y Hanna 2000).

## **2 Cambios estructurales del almidón durante el proceso de extrusión**

El procesamiento del almidón es mucho más complejo y difícil de controlar que para muchos otros polímeros. Mientras que el procesamiento de la mayoría de los polímeros sintéticos constituye fusión, mezcla/composición y conformación, el procesamiento del almidón también implica la transformación (ruptura granular, fusión cristalina, etc.) del almidón desde un estado granular nativo a un estado fundido (Xie y col 2006).

Durante la extrusión, el almidón se somete a presión relativamente alta, al calor y fuerzas de cizallamiento mecánico. Los enlaces de hidrógeno entre las cadenas de almidón que proporcionan integridad de los gránulos de almidón se pueden romper bajo alta fuerza de cizallamiento y temperatura. Como resultado, se pueden producir cambios significativos estructurales, incluyendo la gelatinización, fusión, y la fragmentación (Herrera y col 2017).

La estructura granular se somete, debido al calor y al cizallamiento, a una transición de orden y desorden denominada gelatinización. Durante la gelatinización, los gránulos se hinchan cuando absorben agua. Esta hinchazón se produce principalmente en las capas amorfas de amilosa, y la amilosa es capaz de filtrarse fuera del gránulo. Las dobles hélices de amilopectina en esta región se disocian, y el gránulo pierde rápidamente toda cristalinidad. Este proceso puede acelerarse por corte (de Graaf y col 1998). Así, la pérdida de cristalinidad es causada por el rompimiento

mecánico de los enlaces moleculares debido a las intensas condiciones de corte (Jiménez y col 2012).

Una diferencia principal en la modificación del almidón en un extrusor, en comparación con el simple calentamiento en presencia de humedad, es la degradación de las moléculas de almidón en unidades oligosacáridas más pequeñas debido a las fuerzas mecánicas. La gelatinización del almidón típicamente causa que la viscosidad aumente a medida que las moléculas de almidón se despliegan y se enredan más fácilmente. Sin embargo, las fuerzas de corte en una extrusora rompen estas hebras en unidades más pequeñas, lo que causa una disminución en la viscosidad debido al tamaño de partícula más pequeño. Cuando los materiales amiláceos salen del molde de una extrusora, estas estructuras moleculares se enfrían y se forman en redes y hebras que influyen en la textura del producto. La extensión de estos procesos que ocurren durante la extrusión determina las características físicas del producto (solubilidad, estructura interna, etc.). La elección de las condiciones de operación, las características del extrusor y otros ingredientes determinan el alcance de estas reacciones y la calidad máxima del producto (Hartel y Heldman 2012).

## **E APLICACIÓN POSCOSECHA**

### **1 Empleo de películas y recubrimientos comestibles para la conservación de frutas y hortalizas**

Los frutos son altamente perecederos ya que contienen 80-90% de agua en peso. Las pérdidas importantes en calidad y cantidad de frutas y verduras frescas ocurren entre la cosecha y el consumo; cuando se cosecha la fruta, hay un cambio en el

equilibrio gaseoso entre el consumo de oxígeno y la producción de dióxido de carbono. En esta nueva condición, las células no se renuevan y las tasas de transferencia de gas aumentan, causando una pérdida metabólica y llevando la fruta a una maduración gradual y eventual senescencia (Dhall 2013).

Con el objetivo de evitar o minimizar los efectos adversos de los factores citados y conjuntamente prolongar la vida poscosecha de los productos hortofrutícolas se han implementado diferentes tecnologías; entre ellas se pueden mencionar, el almacenamiento a bajas temperaturas, aplicación de radiaciones gamma y ultravioleta, el control biológico, la conservación por atmósfera controlada, la utilización de empaques plásticos, el uso de películas y la aplicación de recubrimientos comestibles, entre otras (Aguilar-Méndez y col 2012).

Esta última revelando un papel significativo en la vida de anaquel de los alimentos debido a que reducen la pérdida de agua, permiten el control respiratorio, retrasan el envejecimiento y mejoran la calidad y valor comercial de los mismos, manteniendo sus atributos de calidad y valor nutritivo. Por tal motivo muchas investigaciones han dedicado su estudio sobre el uso de estas tecnologías aplicadas a una amplia gama de productos hortofrutícolas (Vargas y col 2008).

Asimismo, las películas comestibles y los recubrimientos comestibles pueden admitir y transportar ingredientes funcionales tales como antioxidantes, antimicrobianos, nutrimentos, sabores y colorantes para destacar la calidad, funcionalidad y seguridad de los alimentos, siendo esta actualmente una de las características más importantes en el uso de cubiertas (Falguera y col 2011). El uso

de cubiertas también mejora las propiedades mecánicas en el manejo de productos hortícolas (Pérez y Báez 2003).

Dichos recubrimientos al controlar transferencia de humedad, gases y compuestos volátiles, han demostrado la capacidad de mejorar la integridad y la calidad de los alimentos, además de prolongar su vida de almacenamiento. Sin embargo; al recubrir un fruto u hortaliza para retardar la pérdida de humedad, es necesario que exista una cierta permeabilidad al oxígeno y dióxido de carbono para evitar una respiración anaeróbica que podría inducir desórdenes fisiológicos y una pérdida rápida de la calidad y vida de anaquel en los mismos (Pérez y Báez 2003). De aquí que sea de vital importancia determinar los efectos de estos recubrimientos en la composición gaseosa interna y sus interacciones en los parámetros de calidad del producto fresco en estudio (cambios de color, pérdida de firmeza, fermentación alcohólica, tasa de decaimiento o pudrición, pérdida fisiológica de peso, etc.) (Park 1999).

## **2 Efecto de las películas y recubrimientos comestibles sobre las propiedades de calidad de frutas y hortalizas**

### **a Pérdida de agua**

La pérdida fisiológica de peso en los frutos se asocia principalmente, con la transpiración y es propia de cada vegetal, la velocidad de la pérdida de agua depende del gradiente de presión entre el tejido de la fruta, la atmósfera circundante y la temperatura de almacenamiento. Diferencias de presión de vapor baja entre la fruta y sus ambiente externo y temperatura de refrigeración son las condiciones más recomendables para el almacenamiento de las frutas (Hernández- Muñoz y col 2008).

El mecanismo principal de pérdida de humedad en frutas y vegetales es la difusión de vapor de agua. Lo anterior debido a un gradiente de presión entre el interior y exterior del fruto. Las películas sobre la superficie de los frutos actúan como barreras a la difusión del vapor de agua, lo que se traduce en menores tasas de pérdida de humedad. El espesor de la barrera y la permeabilidad a la humedad, son factores importantes desde el punto de vista de la velocidad de transferencia de masa (Maftoonazad y Ramaswamy 2005).

Figueroa y col (2013) obtuvieron una menor pérdida de peso en frutos de mango tratados con un recubrimiento de almidón nativo de yuca. Por su parte, Hoa y col (2001) reportaron una disminución de la pérdida de peso en frutos de mango recubiertos en comparación a los no recubiertos.

## **b Firmeza**

La pérdida de textura es el cambio más notable que ocurre en frutas y vegetales durante su almacenamiento, y está relacionada con los cambios metabólicos y con la pérdida de humedad (Rojas-Graü y col 2009). La pérdida de firmeza durante la maduración es uno de los principales factores que determinan la calidad y vida poscosecha de muchos frutos (García y col 1998).

Previo a la maduración, los frutos tienen una estructura celular rígida, ordenada y bien definida, mientras que paredes celulares blandas y difusas caracterizan los tejidos vegetales de los frutos maduros. El ablandamiento de los frutos es atribuido a la degradación de los componentes de la pared celular, principalmente pectinas, debido

a la acción de enzimas específicas tales como pectinesterasa y poligalacturonasa (Brownleader y col 1999).

Se ha observado que ambientes con concentraciones bajas de O<sub>2</sub> y altas en CO<sub>2</sub>, reducen la actividad enzimática causante de la degradación de las paredes celulares, permitiendo así la retención de firmeza de las frutas y vegetales durante su vida poscosecha. Además, bajo estas mismas condiciones, se puede retardar la biosíntesis de etileno, el cual puede desencadenar la actividad de los genes de la maduración que conllevan, de igual manera, a la degradación de los componentes celulares (Maftoonazad y Ramaswamy 2005).

Las películas comestibles pueden conservar la firmeza de frutas y vegetales, al actuar como una barrera parcial al agua y servir como portador de potenciadores de textura (Olivas y Barbosa-Cánovas 2009). Estrada-Mesa y col (2015) reportan una disminución de la pérdida de firmeza en frutos de mango recubiertos por soluciones a base de almidón y de pectina cítrica en comparación a los frutos no recubiertos. De igual manera, Trejo-Márquez y col (2007) obtuvieron mayores valores de firmeza en fresas recubiertas con una formulación a base de gelatina.

### **c Color**

La evaluación del color es un importante parámetro de calidad para aplicaciones industriales potenciales de películas comestibles, ya que los consumidores a menudo asocian aspectos tales como el brillo y el color de los alimentos, que pueden verse afectados por los recubrimientos y las películas comestibles, con la calidad de los alimentos (Andrade-Pizarro y col 2015).

El color es el cambio más obvio que se presenta en muchos frutos y es, a menudo, el principal criterio utilizado por los consumidores para determinar si un fruto está maduro o no. Los cambios de color durante la maduración de la mayoría de los frutos son producto, principalmente, de la degradación de la clorofila y la síntesis de pigmentos tales como carotenoides y antocianinas (Brownleader y col 1999). Los principales agentes responsables de la degradación de la clorofila son los cambios en el pH, oxidaciones y la actividad de las clorofilasas (Wills 2016).

Como ya se ha mencionado, los recubrimientos en frutos pueden crear una atmósfera modificada entre la película y la superficie de los mismos. Kader (1986) afirma que la pérdida de la clorofila y la biosíntesis de carotenoides y antocianinas pueden ser retrasadas en frutos y vegetales mantenidos en atmósferas modificadas y/o controladas.

Maftoonazad y Ramaswamy (2005) estudiaron el efecto de cubiertas a base de metilcelulosa en la vida poscosecha de frutos de aguacate. Ellos reportaron una disminución en la velocidad de degradación del color verde en frutos tratados. Lo anterior lo atribuyeron a la presencia de concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> alrededor de los frutos. Por su parte, Aguilar-Méndez y col (2008) reportan una mejor retención del color en frutos de aguacate recubiertos con una solución a base de gelatina-almidón, resultado de la atmósfera modificada creada por los recubrimientos.

## IV JUSTIFICACIÓN

En los últimos años se ha incrementado la demanda de alimentos más saludables, lo que ha fomentado el desarrollo de películas comestibles, y su aplicación como recubrimiento a productos hortofrutícolas, para conservar sus características sensoriales y aumentar su vida útil. Es por ello que su formulación es una de las alternativas más prometedoras en el área de la conservación de alimentos.

Estudios previos han demostrado que las películas elaboradas a partir de polisacáridos, como el almidón, son ampliamente utilizados debido a que presentan buenas propiedades mecánicas y de barrera, sin embargo, debido a su carácter hidrofílico presentan una baja resistencia a la pérdida de agua. Se ha buscado reforzar estas propiedades mediante la adición de proteínas a la formulación, con el objetivo de contrarrestar las deficiencias propias de cada componente y así poder mejorar las características de las películas y recubrimientos comestibles.

Otra opción para el mejoramiento de las propiedades funcionales de las películas y recubrimientos comestibles, principalmente las de barrera, son las modificaciones químicas de la molécula de almidón. Se ha demostrado que la acetilación reduce su afinidad al agua, por lo que presenta gran potencial para su utilización en la elaboración de películas y recubrimientos comestibles. Son pocos los estudios en cuanto a películas elaboradas a partir de gelatina y almidón modificado por acetilación, por lo que surge la necesidad de contribuir con más información sus características y propiedades mecánicas y de barrera; así como el efecto de la aplicación de recubrimientos elaborados a partir de estos compuestos.

## **V OBJETIVOS**

### **A GENERAL**

Evaluar el efecto del contenido de gelatina, glicerol y almidón acetilado en la elaboración de películas comestibles y su aplicación como recubrimiento en un fruto modelo.

### **B ESPECÍFICOS**

1. Elaborar películas comestibles utilizando almidón nativo de maíz acetilado mediante el proceso de extrusión, gelatina y glicerol como plastificante, y caracterizarlas en función de sus propiedades mecánicas (resistencia a la ruptura, deformación) y de barrera (solubilidad, permeabilidad al vapor de agua) de acuerdo al diseño experimental.
2. Evaluar el efecto del contenido de gelatina y glicerol sobre las propiedades mecánicas y de barrera de las películas comestibles.
3. Seleccionar utilizando la metodología de superficie de respuesta, el mejor contenido de gelatina y glicerol para la elaboración de películas comestibles con las mejores propiedades mecánicas y de barrera y su validación.
4. Aplicar la formulación elaborada con condiciones óptimas sobre un fruto modelo y evaluar su efecto en la calidad poscosecha (firmeza, pérdida de peso, color, pH, sólidos solubles, acidez titulable).

## VI MATERIALES Y MÉTODOS

### A MATERIALES

#### 1 Materia prima

Para la elaboración de las películas comestibles se utilizó almidón de maíz (Ingredion, Colombia) obtenido de la empresa Fabsa S.A de C. V., glicerol JT Baker como plastificante y gelatina comercial (Tipo A) de 280 Bloom. Para la modificación química del almidón se utilizó el reactivo anhídrido acético JT Baker.

### B METODOLOGÍA

#### 1 Elaboración de películas comestibles, caracterización y optimización

##### a Diseño experimental

En base a estudios previos y a los resultados obtenidos por ensayos preliminares, se obtuvo un diseño experimental, con la finalidad de encontrar las condiciones óptimas de contenido de gelatina y glicerol para la elaboración de películas comestibles con eficientes propiedades mecánicas y de barrera. Para ello, se utilizó la metodología de superficie de respuesta, donde los factores de estudio (variables independientes) fueron: Contenido de Gelatina (CG) y Contenido de Glicerol (CP), con cinco niveles cada uno (**Cuadro 2**) determinados en base a estudios previos y ensayos preliminares. Las variables dependientes de esta investigación fueron: Resistencia a la Ruptura (RR), Deformación (D), Permeabilidad al Vapor de Agua (PVA) y Solubilidad (S). El número de tratamientos fue establecido de acuerdo a las especificaciones de un diseño central compuesto rotatable de segundo orden con dos factores y un  $\alpha$  de 1.4142 (**Cuadro 3**).

**Cuadro 2.** Factores y niveles de variación de las variables del proceso empleadas en el diseño experimental ( $\alpha = 1.4142$ ).

<b>Factores</b>	<b>Niveles de variación</b>				
	<b>- <math>\alpha</math></b>	<b>- 1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>+<math>\alpha</math></b>
<b>CG (%)</b>	0	2.93	10	17.07	20
<b>CP (%)</b>	15	17.20	22.5	27.80	30

CG= Contenido de Gelatina; CP= Contenido de Glicerol.

**Cuadro 3.** Diseño experimental empleado para obtener diferentes combinaciones de contenido de gelatina y contenido de glicerol para la elaboración de películas comestibles.

Tratamiento <sup>a</sup>	Variables Independientes			
	Codificadas		Decodificadas	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	CG (%)	CP (%)
<b>1</b>	-1	-1	2.93	17.20
<b>2</b>	1	-1	17.07	17.20
<b>3</b>	-1	1	2.93	27.80
<b>4</b>	1	0	17.07	27.80
<b>5</b>	-1.4142	0	0	22.50
<b>6</b>	1.4142	0	20	22.50
<b>7</b>	0	-1.4142	10	15
<b>8</b>	0	1.4142	10	20
<b>9</b>	0	0	10	22.50
<b>10</b>	0	0	10	22.50
<b>11</b>	0	0	10	22.50
<b>12</b>	0	0	10	22.50
<b>13</b>	0	0	10	22.50

## **b Modificación química del almidón**

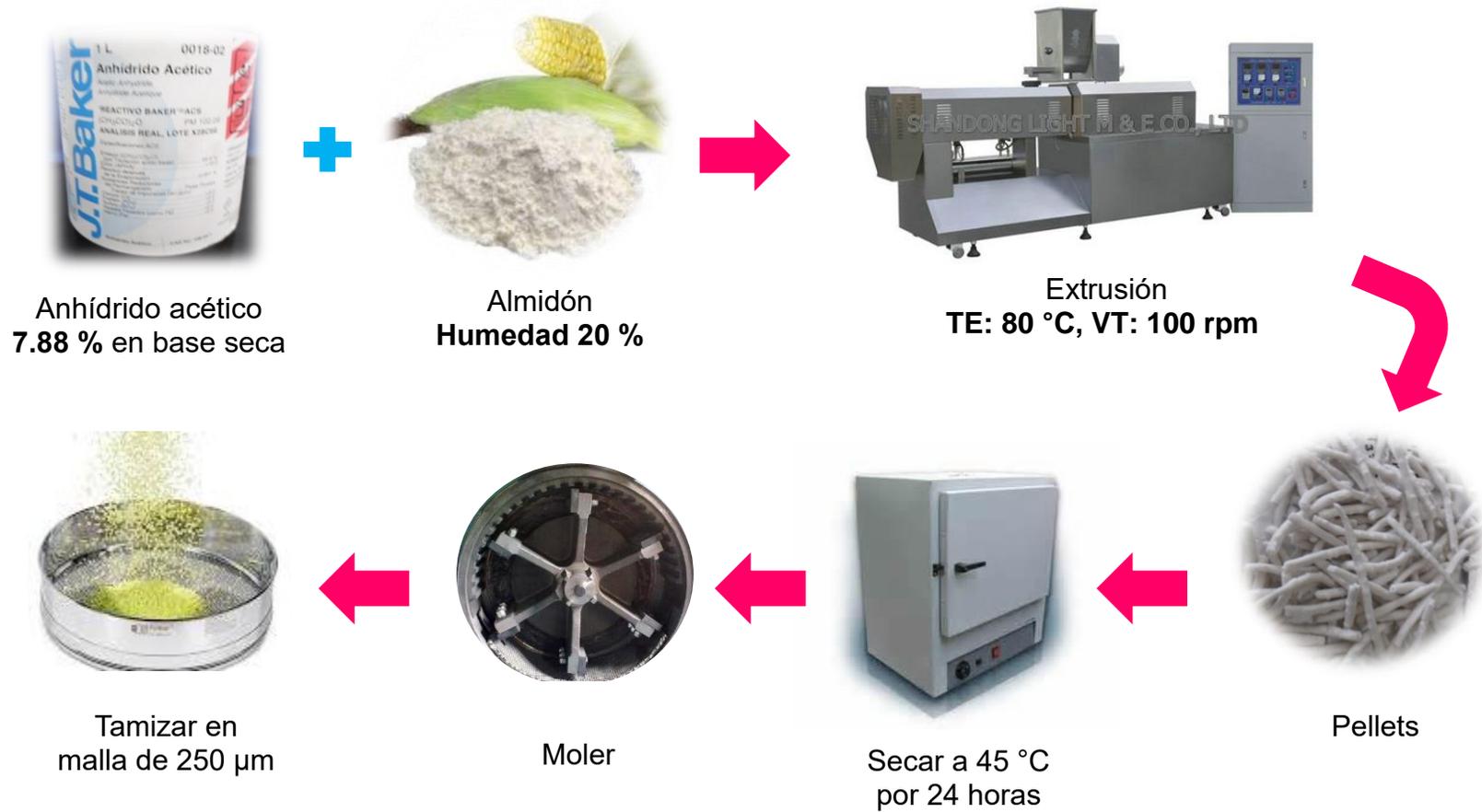
La modificación química del almidón por acetilación se realizó mediante el proceso de extrusión, de acuerdo al método descrito por Félix-Salazar (2017), empleando como reactivo el anhídrido acético. Se adicionó 7.88 % de anhídrido acético en base seca, el cual fue asperjado en el almidón ajustando la humedad al 20 %. Posteriormente se realizó una homogenización de la mezcla.

Una vez agregado el reactivo, el almidón fue extrudido utilizando un extrusor de laboratorio de doble tornillo (Shandong Light M&E LT32L, China), donde las condiciones fueron temperatura del barril de 80-95-80°C y la velocidad de tornillo de 100 rpm, esto con el objetivo de encontrar el máximo grado de sustitución química del almidón de acuerdo al grado alimentario permitido por la FDA (0.2).

El almidón acetilado por extrusión fue secado a 45 °C durante 24 horas, antes de molerse y tamizarse en malla de 250 µm para su posterior análisis y uso como materia prima para la elaboración de películas comestibles (**Figura 7**).

## **c Elaboración de las películas comestibles**

Para la preparación de las películas comestibles se utilizó el método de casting. Se realizó una solución en agua con relación 1:9 de sólidos solubles; con un contenido de gelatina del 0-20%, y glicerol del 15-30%, el resto de sólidos solubles corresponde a la cantidad de almidón acetilado. Se hidrató la gelatina durante 30 minutos en constante agitación, y se calentó en una placa de calentamiento hasta alcanzar los 70°C, manteniendo esta temperatura durante 10 minutos. Posteriormente, se agregó el 50% del contenido de glicerol correspondiente de acuerdo al diseño experimental.



**Figura 7.** Esquema de acetilación del almidón mediante el proceso de extrusión.

A la par, se hidrató el almidón y se le adicionó el resto del plastificante; consecutivamente, se calentó hasta alcanzar los 65°C y se le fue adicionada la gelatina previamente calentada. Se mantuvo en agitación constante hasta homogeneizar.

Una vez realizada la mezcla, 25 g de la formulación fueron vertidos en moldes de acrílico de área conocida. Los moldes con la muestra se colocaron en una estufa a 40 °C durante 5 horas. Una vez secas las películas, se despegaron de los moldes y se les midió el espesor, utilizando un micrómetro digital (Modelo Fisher Scientific). Se realizaron 8 mediciones en igual número de puntos equidistantes de las películas, de las cuales se calculó el promedio para cada muestra. Finalmente se acondicionaron en un desecador que contenía una solución saturada de  $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  para mantener 53 % de humedad relativa (**Figura 8**).

#### **d Caracterización fisicoquímica de las películas comestibles**

##### **1) Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas evaluadas fueron resistencia a la ruptura y deformación de las películas comestibles, utilizando la metodología descrita por Fitch-Vargas y col (2016). Para la determinación de esta propiedad se empleó un texturómetro universal INSTRON 3342. Para ello, muestras de películas comestibles de 5 cm de diámetro fueron fijadas entre dos placas de acrílico, con orificio de 1.6 cm de diámetro, y un anillo anular de sujeción entre las placas y la película. Una celda esférica de 1.27 cm de diámetro fue utilizada para penetrar las películas a una velocidad constante de 5 mm/s. Se evaluaron los cambios de la fuerza máxima justo antes del rompimiento (resistencia a la ruptura), medida en Newtons (N) y la distancia



**Figura 8.** Esquema de la elaboración de películas comestibles de gelatina, almidón acetilado y glicerol.

recorrida por la celda (deformación), a partir del contacto con la muestra y hasta el momento antes de la ruptura, evaluada en milímetros (mm).

## **2) Propiedades de barrera**

### **a) Permeabilidad al vapor de agua**

La Permeabilidad al Vapor de Agua (PVA) de las películas fue determinada gravimétricamente a 25 °C, de acuerdo a la metodología empleada por Bertuzzi y col (2007), empleando cloruro de calcio como desecante (previamente deshidratado en una estufa a 35 °C). Se utilizaron películas con un espesor de 50 µm, y unos recipientes cuyos diámetros fueron registrados; a los cuales se agregaron 15 g de cloruro de calcio granular. Las películas a evaluar se colocaron sobre el borde superior de cada recipiente y se sujetaron con papel parafilm. Posteriormente, los pesamuestras (los recipientes con la película) se colocaron en un desecador que contenía una solución saturada de cloruro de sodio para generar una humedad relativa de 75 %. Se registró la ganancia de peso del cloruro de calcio cada 12 horas durante 4 días por quintuplicado. Con los datos obtenidos, se generó una gráfica de la ganancia de peso en función del tiempo, de la cual se obtuvo la pendiente (Mp/t). A partir de este valor se determinó la permeabilidad al vapor de agua utilizando la siguiente ecuación:

$$PVA = \frac{(Mp)(E)}{(A)(t)(\Delta p)}$$

Dónde:

Mp: masa de humedad absorbida (g).

E: espesor de la película (m).

A: área de la superficie expuesta de la película (m<sup>2</sup>).

t: tiempo (s).

$\Delta p$ : diferencia de presión parcial a través de la película (Pa).

## **b) Solubilidad en agua**

La solubilidad en agua (S) se determinó de acuerdo con una adaptación de la metodología de solubilidad, propuesta por Chiumarelli y Hubinger (2012). Las películas comestibles fueron secadas en una estufa por un periodo de 24 horas a 105 °C. Una vez secas, se utilizaron 0.5 g ( $m_i$ ) de estas películas comestibles, las cuales fueron inmersas en 50 mL de agua destilada en un matraz Erlenmeyer con pequeñas porciones de cloroformo (0.02%) utilizado como agente antimicrobiano. Se mantuvieron en agitación constante durante 24 horas; después de este periodo las muestras se secaron durante 24 h a 105 °C para determinar el peso final ( $m_f$ ). La S se determinó en términos de porcentaje de material desintegrado, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\%S = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \times 100$$

Dónde:

$\%S$  = porcentaje de solubilidad en agua.

$m_i$  = masa inicial de la muestra (g).

$m_f$  = masa final de la muestra (g).

## **e Optimización**

Se utilizó un modelo de segundo orden con dos factores para predecir el comportamiento experimental, mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1x_1 + \hat{\beta}_2x_2 + \hat{\beta}_{11}x_1^2 + \hat{\beta}_{22}x_2^2 + \hat{\beta}_{12}x_1x_2 + \varepsilon$$

En donde  $\hat{y}$  es la función respuesta genérica,  $x_1$  y  $x_2$  son las variables independientes.  $\hat{\beta}_i$  y  $\hat{\beta}_{ij}$  son los coeficientes de regresión estimados y  $\varepsilon$  es el residuo que mide el error experimental. Se aplicó una regresión, se eliminaron los términos no significativos del polinomio de segundo orden y se calculó un nuevo polinomio hasta obtener un modelo predictivo para cada variable de respuesta.

Se optimizó mediante el método numérico, buscando los valores más altos de Resistencia a la Ruptura (RR) y Deformación (D) y los más bajos de Solubilidad (S) y Permeabilidad al Vapor de agua (PVA); utilizando el paquete estadístico Desing-Expert versión 7.0.0 (Stat-Ease 2005).

## **f Preparación de la formulación óptima y elaboración de películas comestibles**

Una vez obtenidas las condiciones óptimas de contenido de gelatina y glicerol, se comprobó experimentalmente el modelo empleado; obteniendo la formulación de almidón acetilado, gelatina y plastificante para la elaboración de películas comestibles bajo las condiciones óptimas predichas por el mismo. Dicha formulación fue aplicada como recubrimiento en un fruto modelo (mango cv. Haden).

## **2 Validación del efecto de un recubrimiento comestible de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol sobre las características de calidad de un fruto modelo**

### **a Aplicación de los recubrimientos comestibles**

Para evaluar el efecto de la película comestible del tratamiento óptimo obtenido sobre los atributos de calidad, se utilizó como material vegetal mango cv. Haden. Los frutos fueron obtenidos de una huerta ubicada en Aguaruto, Sinaloa; cosechados en estado verde-maduro, y seleccionados con base a la libertad de defectos, uniformidad de color y tamaño. Fueron transportados al laboratorio y lavados en una solución de hipoclorito de sodio (100 ppm); se dejaron secar en condiciones ambientales. Una vez limpios y secos, se dividieron en 4 lotes, asignándose al azar los siguientes tratamientos (**Figura 9**):

- **Control:** Frutos modelo sin recubrimiento.
- **CC:** Frutos modelo recubiertos con cera de carnauba.
- **ANP:** Frutos modelo recubiertos con una formulación de almidón de maíz nativo y glicerol.
- **AAG:** Frutos modelo recubiertos con una formulación de almidón acetilado, gelatina y glicerol (optimizada).

Los recubrimientos ANP y AAG fueron aplicados mediante la técnica de inmersión. Los frutos fueron sumergidos en la solución formadora de películas del tratamiento óptimo durante 30 segundos, posteriormente se dejaron secar en condiciones ambientales. El tratamiento CC se aplicó manualmente esparciendo perfectamente



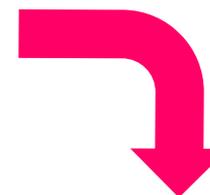
**Mango cv. Haden**



**Lavado y desinfección  
NaClO 100 ppm**



**Escurreido**



**Aplicación de los  
tratamientos**



**Tratamientos**



**Almacenamiento  
 $12 \pm 1$  °C**

**Figura 9.** Diagrama del desarrollo experimental de la validación de un recubrimiento comestible optimizado.

con un pequeño pedazo de tela limpia una gota de solución sobre toda la superficie del fruto limpio y seco a  $25 \pm 1$  °C, simulando las condiciones de aplicación por goteo utilizadas en la agrícola.

Los frutos se mantuvieron en refrigeración a  $12 \pm 1$  °C durante un periodo de 20 días, durante el cual se llevaron a cabo las evaluaciones de los parámetros de calidad (pérdida de peso, color externo e interno, firmeza, pH, acidez titulable, y sólidos solubles). Estas se realizaron cada 4 días por triplicado en cada unidad experimental.

## **b Evaluación de parámetros de calidad en un fruto modelo**

### **1) Análisis físicos**

#### **a) Pérdida de peso**

La pérdida de peso se determinó de acuerdo a la metodología reportada por Henríquez y col (2005). La determinación se realizó utilizando 5 frutos por cada tratamiento, registrándose el peso cada 4 días con el empleo de una balanza Sartorius (TE 4101, Goettingen, Alemania). Los valores se expresaron como porcentaje de pérdida de peso en relación al peso inicial del mismo.

$$\text{Pérdida de peso} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} \times 100$$

#### **b) Color externo**

Se evaluó el color externo en la cáscara del fruto tomando lecturas en tres puntos diferentes utilizando un colorímetro MINOLTA (CR-210, Minolta Chromameter, Osaka,

Japón) con lámpara de arco xenón pulsada; previamente calibrado sobre una placa blanca. Se registraron los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  de a escala de color CIE, donde  $L^*$  representa la luminosidad del color y va de negro a blanco con valores de 0 a 100, el valor positivo y negativo de  $a^*$  indican una coloración roja y verde, respectivamente; mientras que el valor de  $b^*$  indica la variación de color amarillo a azul (McGuiree 1992). La lectura del color se tomó en tres puntos diferentes de la superficie de cada fruto. La diferencia total de color ( $\Delta E$ ) se calculó tomando como referencia los valores del fruto al día cero y empleando la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

### **c) Color interno**

Se evaluó el color interno o de la pulpa del fruto tomando lecturas en tres puntos diferentes en el interior de cada uno de los cachetes del fruto, utilizando un colorímetro MINOLTA (CR-210, Minolta Chromameter, Osaka, Japón) con lámpara de arco xenón pulsada; 2º observación de la comisión internacional en iluminación (CIE), iluminante C y área de 8 mm de diámetro, previamente calibrado sobre una placa blanca. Tomadas las lecturas se registró el promedio de los valores  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  (León-Villanueva 2009). Se calculó la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) con el fin de establecer el comportamiento de los frutos, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

### **d) Firmeza**

La firmeza se evaluó de acuerdo a lo reportado por Calderón-Castro y col (2018), con algunas modificaciones. Este parámetro se determinó en tres puntos del fruto sin

cáscara, utilizando un texturómetro universal INSTRON 3342, donde se midió la fuerza de compresión expresada en Newtons (N) utilizando una punta de 11 mm tocando ligeramente la superficie del fruto. La punta se introdujo en el tejido con una profundidad de 3 mm y a una velocidad constante de 5 mm/s.

## 2) Análisis químicos

### a) Acidez titulable

Se evaluó por triplicado en la pulpa del fruto modelo mediante la metodología 942.15B descrita por la AOAC (2012). Se tomaron 10 g de pulpa fresca, los cuales fueron homogenizados con 50 mL de agua destilada neutra (pH = 7), en una licuadora comercial (Osterizer, 466-42, México) y se aforaron a 100 mL. Posteriormente la solución obtenida se filtró sobre papel filtro No. 4 y se tomó una alícuota de 20 mL, la cual se tituló con NaOH 0.1 N hasta alcanzar un pH de  $8.1 \pm 0.2$  (punto de vire de la fenolftaleína). Las evaluaciones se realizaron a tres unidades experimentales, tomando tres lecturas por fruto. Los resultados se expresaron como porcentaje de ácido cítrico de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Acidez titulable} = \frac{(VG)(MEqA)(N)(V)}{(PM)(A)}$$

Donde:

VG= Volumen gastado de NaOH (mL).

MEqA= Peso miliequivalente de ácido cítrico (0.06404).

$N$ = Normalidad del NaOH (0.1 N).

$V$ = Volumen inicial de la disolución (mL).

$A$ = Alícuota tomada de la disolución (mL).

$PM$ = Peso fresco de la muestra del tejido (g).

## **b) Determinación de pH**

El pH se evaluó mediante la inmersión directa del electrodo de vidrio de un potenciómetro Orion 3 Star (Termo Electron Corporation, Beverly, MA; EUA) en un vaso de precipitado que contenía la muestra preparada para la determinación de acidez titulable (AOAC 2012). Las determinaciones se realizaron en tres unidades experimentales por triplicado y los resultados se expresaron como iones de Hidrógeno.

## **c) Sólidos Solubles Totales (°Brix)**

Se determinó el contenido de sólidos solubles mediante refractometría de acuerdo con el método 22.014 de la AOAC (2012), colocando una gota del jugo de la pulpa del fruto en el refractómetro tipo Abbe (Milton Roy Company, Ivyland, PA, EUA). El contenido de Sólidos Solubles Totales (SST) se reportó como porcentaje de azúcar (°Brix).

## **c Análisis estadístico**

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó un diseño completamente al azar con dos factores: Tipo de recubrimiento, con 4 niveles (Control, CC, ANP, AAG) y Días de almacenamiento, con 6 niveles (0, 4, 8, 12, 16 y 20), utilizando el paquete estadístico STATGRAPHICS Plus 5.1 (Statistical Graphics Co., Rockville, Md). Se realizó un análisis

de varianza (ANOVA) y las comparaciones de medias se efectuaron mediante la diferencia mínima significativa (LSD, Least Significant Difference) de Fisher con un nivel de confianza del 95%.

## VII RESULTADOS Y DISCUSIONES

### A ELABORACIÓN DE PELÍCULAS COMESTIBLES, CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN

#### 1 Resultados experimentales de las variables de respuesta evaluadas a las películas comestibles

Las películas comestibles elaboradas a partir de una mezcla de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol como plastificante, presentaron diversas propiedades mecánicas y de barrera. En el **Cuadro 4** se observan los valores experimentales obtenidos para cada una de las variables de respuesta estudiadas. Obteniendo los siguientes rangos de valores; Resistencia a la Ruptura (RR): 7.42 - 22.25 N, Deformación (D): 4.81 - 17 mm, Permeabilidad al Vapor de agua (PVA):  $1.57 \times 10^{-11}$  -  $4.21 \times 10^{-11}$  g/Pa s m, Solubilidad en agua (S): 22.63 - 42.12 %. En la **Figura 10** se pueden observar algunas de las películas comestibles obtenidas en esta investigación.

En el **Cuadro 5** se presenta el análisis de varianza para las variables de respuesta estudiadas: RR, D, PVA y S. Los datos mostraron un modelo de regresión significativo, con valores de  $R^2$  ajustada  $\geq 0.82$ , coeficientes de variación (CV)  $\leq 15.89$  % y p de F  $< 0.0001$ .

#### a Propiedades Mecánicas

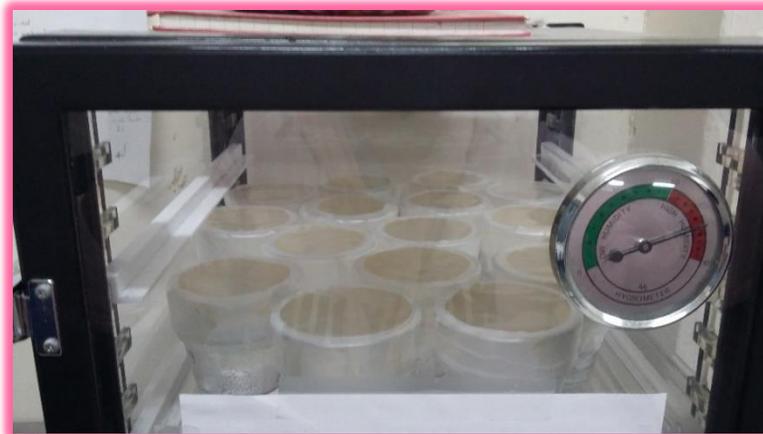
##### 1) Resistencia a la ruptura

En el **Cuadro 6** se observan los coeficientes utilizados para cada una de las variables de respuesta; se puede apreciar que tanto el contenido de gelatina, como el contenido de glicerol presentaron efecto significativo sobre la Resistencia a la

**Cuadro 4.** Valores experimentales de las variables de respuesta evaluadas a películas comestibles de almidón acetilado, gelatina y glicerol.

Tratamiento <sup>a</sup>	CG <sup>b</sup> (%)	CP <sup>b</sup> (%)	RR <sup>c</sup> (N)	D <sup>c</sup> (mm)	PVA <sup>c</sup> (g/Pa s m)	S <sup>c</sup> (%)
1	2.93	17.20	16.28	6.58	2.17x10 <sup>-11</sup>	22.63
2	17.07	17.20	19.72	8.75	2.66x10 <sup>-11</sup>	31.50
3	2.93	27.80	10.61	9.21	3.48x10 <sup>-11</sup>	27.74
4	17.07	27.80	13.59	15.86	3.82x10 <sup>-11</sup>	35.00
5	0	22.50	13.03	6.62	2.12x10 <sup>-11</sup>	27.65
6	20	22.50	19.09	16.60	3.07x10 <sup>-11</sup>	42.12
7	10	15.00	22.25	4.81	1.57x10 <sup>-11</sup>	25.45
8	10	30.00	7.42	17.00	4.21x10 <sup>-11</sup>	36.38
9	10	22.50	15.48	6.44	2.76x10 <sup>-11</sup>	28.10
10	10	22.50	14.68	8.70	2.82x10 <sup>-11</sup>	28.98
11	10	22.50	15.99	7.93	2.48x10 <sup>-11</sup>	29.07
12	10	22.50	14.54	7.85	2.49x10 <sup>-11</sup>	26.11
13	10	22.50	15.08	7.32	2.55x10 <sup>-11</sup>	27.37

<sup>a</sup> El orden de la tabla no corresponde al orden de la corrida experimental; <sup>b</sup> factores CG= Contenido de Gelatina, CP= Contenido de Glicerol. <sup>c</sup> Variables de respuesta: RR= Resistencia a la Ruptura, D= Deformación, PVA= Permeabilidad al Vapor de Agua, S= Solubilidad.



**Figura 10.** Películas comestibles de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol.

**Cuadro 5.** Análisis de varianza de las variables de respuesta evaluadas a películas comestibles de almidón acetilado, gelatina y glicerol.

<b>Respuesta</b>	<b>R<sup>2</sup> Ajustada</b>	<b>CV* (%)</b>	<b>Valor F</b>	<b>P de F (modelo)</b>	<b>Falta de ajuste</b>
<b>RR</b>	0.90	7.90	56.24	<0.0001	0.05
<b>D</b>	0.87	15.89	16.67	0.0009	0.05
<b>PVA</b>	0.84	10.27	32.86	<0.0001	0.08
<b>S</b>	0.82	7.43	5.05	0.0003	0.07

\*CV= Coeficiente de Variación.

**Cuadro 6.** Modelo estadístico de las variables de respuesta evaluadas a películas comestibles de almidón acetilado, gelatina y glicerol.

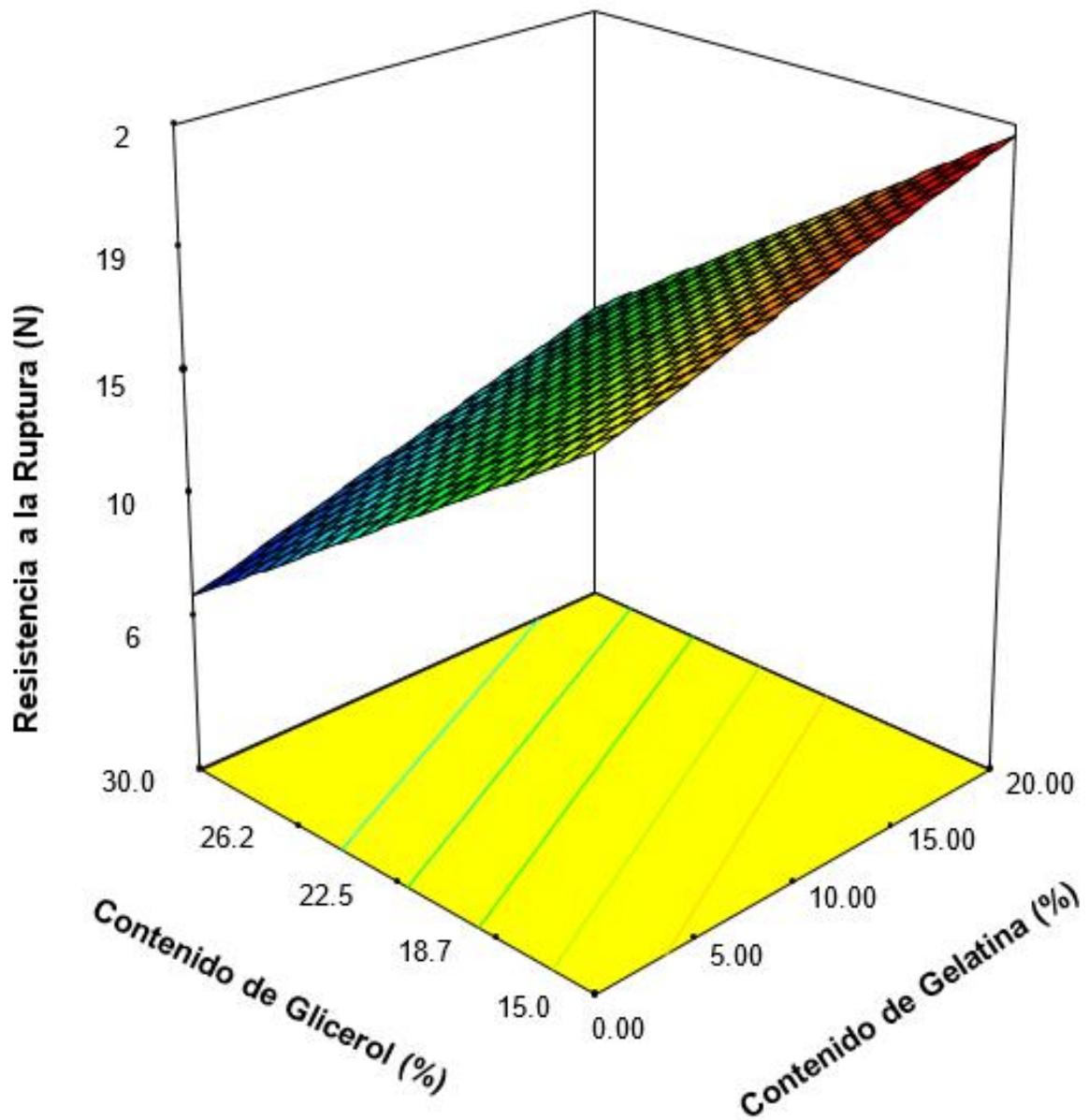
	<b>RR</b>	<b>D</b>	<b>PVA</b>	<b>S</b>
<b>Intercepto</b>	15.21	7.65	2.784x10 <sup>-11</sup>	28.33
<b><i>Lineal</i></b>				
<b>CG</b>	1.87 *(0.0013)	2.87 (0.0010)	2.718x10 <sup>-12</sup> (0.0228)	4.57 (0.0002)
<b>CP</b>	-4.10 (<0.0001)	3.37 (0.0004)	7.734x10 <sup>-12</sup> (<0.0001)	3.01 (0.0040)
<b><i>Cuadrático</i></b>				
<b>CG</b>	NS	1.69 (0.0213)	NS	2.48 (0.0155)
<b>CP</b>	NS	1.34 (0.523)	NS	NS
<b><i>Interacción</i></b>				
<b>CG-CP</b>	NS	1.12 (0.1825)	NS	NS

RR= Resistencia la Ruptura; D= Deformación; PVA= Permeabilidad al Vapor de Agua; S= Solubilidad; NS: No Significativo a  $\alpha < 0.05$ ; \* Valor de p de f.

Ruptura (RR), en sus términos lineales ( $p=0.0013$  y  $p<0.0001$ , respectivamente). El modelo matemático presentó valores de  $R^2= 0.90$ ,  $CV= 7.90 \%$  y una probabilidad de ajuste significativa ( $p<0.0001$ ).

En la **Figura 11** se aprecia el comportamiento de la RR con respecto al contenido de gelatina y al contenido de glicerol; el factor que tuvo mayor efecto fue el contenido de glicerol, lo cual concuerda con el análisis estadístico. Se muestra una disminución en la RR al aumentar la concentración del glicerol. Este comportamiento se debió al efecto plastificante del glicerol; ya que los plastificantes reducen las interacciones entre las cadenas adyacentes de los biopolímeros, lo que conduce a la movilidad creciente y por lo tanto, a la flexibilidad de las películas (Bergo y Sobral 2007).

Su y col (2010) observaron una disminución en la RR al aumentar el contenido de glicerol en películas de carboximetil-celulosa y aislado de proteína de soya; concluyendo que el glicerol es un plastificante de molécula pequeña que puede penetrar entre las cadenas de polímero y debilitar la interacción entre los polisacáridos y las proteínas. De igual manera Mali y col (2005) reportan que el glicerol afectó las propiedades mecánicas de películas comestibles de almidón de yuca, ya que obtuvieron películas menos resistentes al utilizar este plastificante; lo cual atribuyen al carácter higroscópico de la molécula del glicerol que tiende a proporcionar agua adicional en la matriz de la película. Resultados similares fueron obtenidos por Al-Hassan y Norziah (2012), quienes informaron que las películas basadas en polisacáridos y proteínas con adición de glicerol, tenían menores valores de resistencia a la tracción debido al efecto plastificante que aumentaba la movilidad de las cadenas de polímero.



**Figura 11.** Efecto del contenido de gelatina y glicerol sobre la resistencia a la ruptura de películas comestibles elaboradas a partir de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol.

Por otro lado, se puede observar un aumento en la RR a medida que la concentración de gelatina fue mayor, teniendo como valor máximo para esta variable de respuesta 22.25 N, y como valor mínimo 7.42 N a menores concentraciones de gelatina. Valores menores fueron encontrados por Fitch-Vargas y col (2016) para películas comestibles obtenidas a partir de una formulación extrudida de almidón de maíz con una mezcla de sorbitol/glicerol, quienes reportan valores de RR 4.67 - 10.48 N. De igual manera, Calderón-Castro y col (2018) reporta valores de RR de 5.03 - 15.02 N para películas comestibles a base de una formulación extrudida de almidón de maíz alto en amilosa y glicerol, resultados también menores a los presentados en la presente investigación. Lo anterior pudo ser debido a un mayor número de interacciones entre las cadenas proteicas de la gelatina presente en la formulación de este trabajo. Aguilar-Méndez y col (2008) atribuyen altos valores de RR a un mayor número de interacciones entre los componentes de la película. De acuerdo con Gontard y col (1993), altas concentraciones de proteína favorecen y mejoran la formación de enlaces entre ellas, producto de la cercanía de sus cadenas.

Andrade-Pizarro y col (2015) reportan un incremento en los valores de RR al aumentar la concentración de gelatina y se lo atribuyen a que altas concentraciones de gelatina, puede causar un mayor número de conexiones físicas durante la formación de la red, por lo que se requiere una mayor fuerza para romper las películas. Del mismo modo, Fakhouri y col (2017) encontraron un claro incremento en la RR con el aumento en la concentración de gelatina en películas comestibles de gelatina y proteínas de gluten.

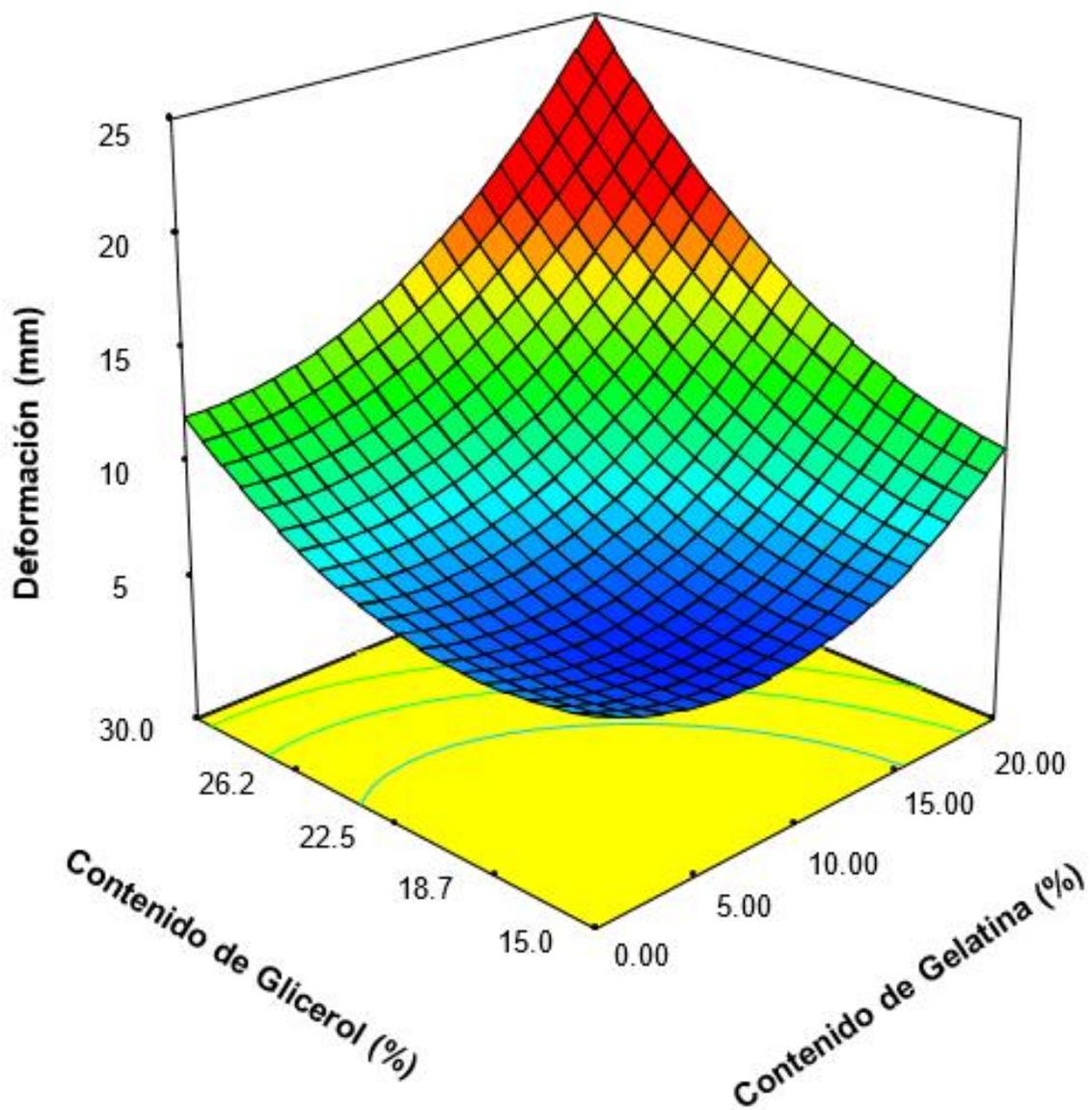
## 2) Deformación

Se encontró que tanto el contenido de gelatina como el contenido de glicerol, en sus términos lineales ( $p = 0.0010$  y  $p = 0.0004$  respectivamente), cuadráticos ( $p = 0.0213$  y  $p = 0.523$  respectivamente) y su interacción ( $p = 0.1825$ ) tuvieron efecto sobre la Deformación (D). El modelo para esta variable de respuesta mostró una  $R^2$  ajustada = 0.87, CV = 15.89 % y p de F = 0.0009. En la siguiente ecuación se muestra el modelo matemático empleado para la deformación de películas comestibles:

$$D = + 7.65 + 2.87 CG + 3.37 CP + 1.69 CG^2 + 1.34 CP^2 + 1.12 CG*CP$$

En la **Figura 12** se presenta el comportamiento de la deformación con respecto al contenido de gelatina y glicerol. El factor que tuvo mayor efecto fue el contenido de plastificante, concordando con obtenido en el análisis estadístico. Los plastificantes reducen las interacciones entre las cadenas adyacentes en el biopolímero, lo que conduce a una movilidad creciente y por lo tanto, a la flexibilidad de las películas (Bergo y Sobral 2007).

Aguilar-Méndez y col (2008) reportan un aumento en los valores de D con el incremento en la concentración del glicerol en películas a base de gelatina y almidón. Estos autores indican que debido a que el glicerol es una molécula hidrofílica, con un peso molecular menor que el de los biopolímeros, evita la interacción entre las cadenas de proteínas y los complejos proteína-almidón. Es posible que las concentraciones más altas de plastificante mejoren la flexibilidad, debido a las interacciones de interposición entre los biopolímeros; lo que favorece los enlaces entre proteína-glicerol-almidón y proteína-glicerol-proteína, por lo que las películas resultarían más



**Figura 12.** Efecto del contenido de gelatina y glicerol sobre la deformación de películas comestibles elaboradas a partir de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol.

deformables. Resultados similares fueron obtenidos por Andrade-Pizarro y col (2015), quienes reportan que la molécula del glicerol es de cadena pequeña e higroscópica, por lo tanto, se inserta fácilmente entre las cadenas de proteínas, atrayendo más agua a la estructura de la película, haciéndola más flexible y por lo tanto más deformable. Chiumarelli y Hubinger (2014) reportan que el aumento de la elongación de las películas como una función del contenido de plastificante, puede estar relacionado con cambios estructurales en la red de los biopolímeros, debido a que la matriz se vuelve menos densa y, bajo tensión, se facilitan los movimientos de las cadenas de polímero.

En el presente trabajo, se obtuvieron valores de D de 4.81 - 17 mm, los cuales fueron similares a lo reportado por Valenzuela-Navarro (2016); quien presenta valores de D de 7.86 – 14.20 mm para películas comestibles elaboradas a partir de una formulación extrudida de almidón de maíz y gelatina, y a lo reportado por Fitch-Vargas y col (2016) quienes obtuvieron valores de 9.21–15.04 mm para películas comestibles elaboradas a partir de una formulación extrudida de almidón de maíz con una mezcla de sorbitol/glicerol.

Por otro lado, se muestra que la deformación de las películas aumentó a medida que la concentración de gelatina fue mayor. Este parámetro, al igual que la resistencia de las películas, está relacionado con la disposición de diferentes componentes de la película y fuerzas de cohesión en la matriz, y se usan normalmente para describir el rendimiento mecánico de las películas (McHugh y Krochta 1994a). El contenido de gelatina aumenta la deformación al mismo tiempo que aumenta la resistencia a la ruptura, lo cual podría ser debido a que las cadenas de gelatina son capaces de reorganizarse en estructuras tipo triple hélice, las cuales incrementan la elasticidad sin

afectar la fuerza de las películas ya que aportan resistencia y flexibilidad. Bigi y col (2004) indican que el nivel de renaturalización afecta en gran medida las propiedades mecánicas y muestran valores crecientes de elasticidad a medida que aumenta el contenido de su triple hélice. Resultados similares fueron obtenidos por Al-Hassan y Norziah (2012) para películas comestibles de gelatina y almidón, quienes señalan que la gelatina aparentemente actuó como un plastificante que aumentó la flexibilidad de la película y redujo la fragilidad de películas comestibles.

Fakhouri y col (2015) reportan que la elasticidad de las películas aumentó con el contenido de proteína en la formulación, observaron que las soluciones de proteínas más concentradas daban como resultado películas más resistentes y más elásticas. Por su parte, Hosseini y col (2013) mencionan que las películas más flexibles eran aquellas que contenían altas concentraciones de gelatina. Asimismo, Gómez-Estaca y col (2011) reportan una deformación 10 veces mayor en las películas a base de gelatina en comparación de las elaboradas a partir de quitosano.

## **b Propiedades de Barrera**

### **1) Permeabilidad al vapor de agua**

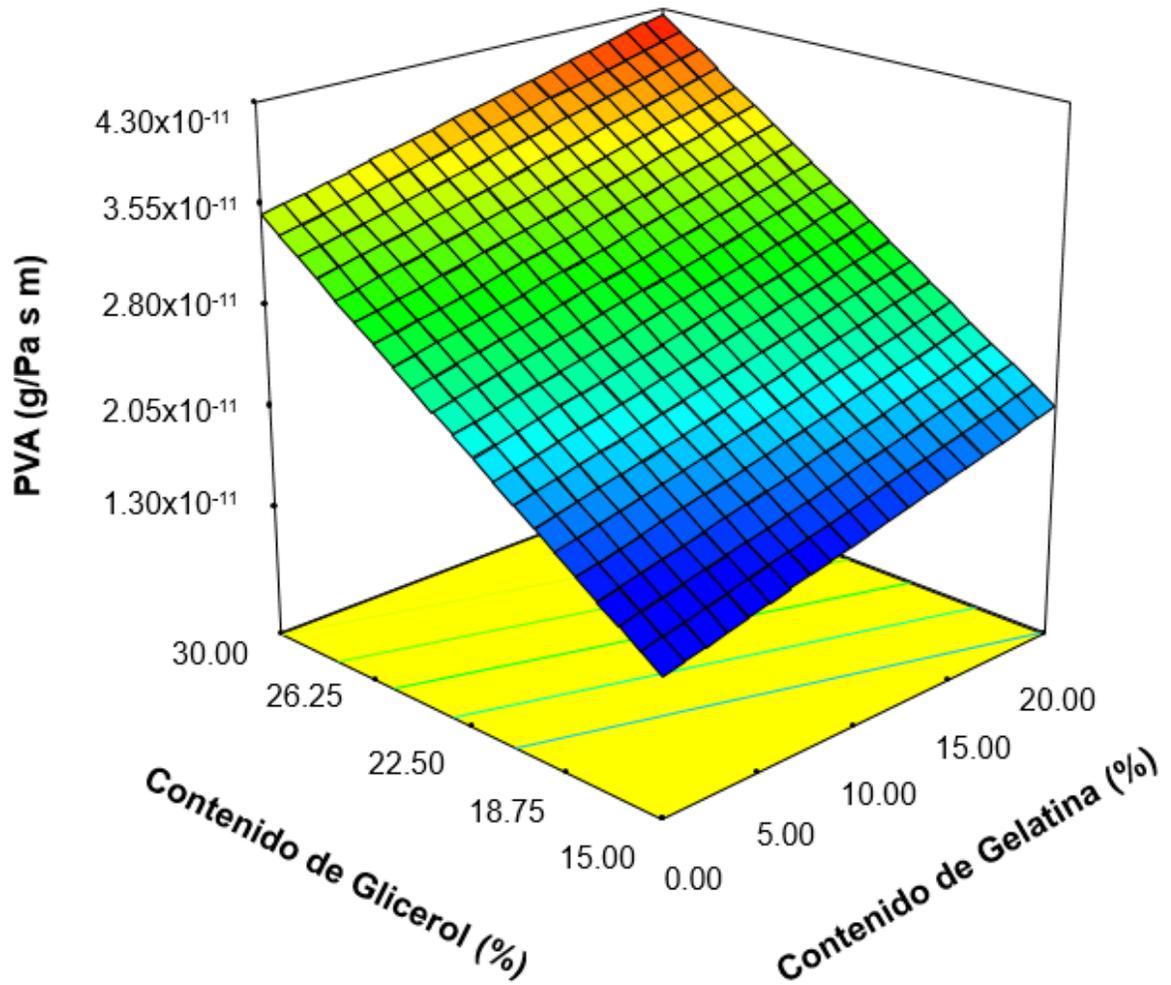
En esta variable tanto el contenido de gelatina como el contenido de glicerol presentaron efecto significativo en sus términos lineales ( $p=0.0228$  y  $p<0.0001$ , respectivamente). El modelo para la Permeabilidad al Vapor de Agua (PVA) presentó una  $R^2$  ajustada = 0.84, CV = 10.27 % y p de F < 0.0001. En la siguiente ecuación se muestra el modelo matemático empleado para la permeabilidad al vapor de agua de las películas comestibles:

$$PVA = + 2.784 \times 10^{-11} + 2.718 \times 10^{-12} CG + 7.734 \times 10^{-12} CP$$

En la **Figura 13** se muestra el comportamiento de la PVA ante el contenido de gelatina y el contenido de glicerol. El factor que presentó mayor efecto sobre esta variable de respuesta fue el contenido de glicerol, lo cual concuerda con el análisis estadístico. Se observa que al aumentar el contenido de glicerol, la PVA incrementa. El glicerol tiene la capacidad de reducir las interacciones entre biopolímeros, lo que incrementa el espacio intermolecular y por lo tanto la permeabilidad de las películas. Además, dicho plastificante, al ser una molécula hidrofílica favorece la adsorción-desorción de las moléculas de agua (Aguilar-Méndez y col 2012).

Sobral y col (2001) reportan un incremento en la PVA con el contenido de glicerol, y mencionan que otro factor que afecta la permeabilidad al vapor de agua de las películas comestibles es el carácter higroscópico de los plastificantes, que aumentan el contenido de agua de la película, lo que a su vez, aumenta la movilidad de las moléculas. La mayor movilidad resulta en un mayor volumen libre y movimientos segmentarios, lo que facilita la migración de las moléculas de vapor de agua a través de la película (Rodríguez y col 2006). Resultados similares fueron obtenidos por Resa y col (2014) y por Dick y col (2015), quienes obtuvieron valores mayores de permeabilidad al vapor de agua con altas concentraciones de glicerol, lo cual es atribuido a que a una alta concentración el glicerol puede agruparse consigo mismo, incrementando el espaciado entre cadenas, debido a la inclusión de moléculas de glicerol entre las cadenas poliméricas. Esto puede promover la difusividad del vapor de agua a través de la película y acelerar su transmisión.

Del mismo modo, se observa un incremento en la respuesta al aumentar el



**Figura 13.** Efecto del contenido de gelatina y glicerol sobre la permeabilidad al vapor de agua de películas comestibles elaboradas a partir de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol.

contenido de gelatina. Obteniendo como valor máximo  $4.21 \times 10^{-11}$  g/Pa s m, a altas concentraciones de gelatina y como valor mínimo  $1.57 \times 10^{-11}$  g/Pa s m, a bajas concentraciones de la misma. Resultados similares fueron obtenidos por Calderón-Castro y col (2018) para películas comestibles elaboradas a partir de una formulación extrudida de almidón alto en amilosa y glicerol, quienes reportan valores de  $2.68 \times 10^{-11}$  -  $4.15 \times 10^{-11}$  g/Pa s m. Por otro lado, Andrade-Pizarro y col (2015) obtuvieron valores de  $3.81 \times 10^{-11}$  -  $12.69 \times 10^{-11}$  g/Pa s m, los cuales son mayores a los presentados en esta investigación. Estos autores reportan un incremento en la PVA con el aumento de la concentración de gelatina, lo cual señalan podría ser causado por la hinchazón de la película debido al agua, que crea varias estructuras en la película.

Al-Hassan y Norziah (2012) mencionan que la adición de gelatina a las películas de almidón conduce a la interacción con las cadenas de almidón que rompen la red de enlaces de hidrógeno entre cadenas de almidón. Dado que la gelatina es más higroscópica que el almidón, la afinidad por las moléculas de agua será mayor en estas películas y, por lo tanto, dará como resultado una mayor difusión del agua, proporcionando películas con mayor PVA. Resultados similares obtuvieron Martucci y Ruseckaite (2010) y Fakhoury y col (2012) quienes obtuvieron mayores valores de PVA en películas con mayor concentración de gelatina en la formulación de sus películas comestibles.

## **b) Solubilidad**

El contenido de gelatina en su término lineal ( $p=0.0002$ ) y el contenido de glicerol en su término lineal ( $p=0.0040$ ) y cuadrático ( $p=0.0155$ ) tuvieron efecto sobre la Solubilidad (S) de las películas comestibles. El modelo presentó una  $R^2$  ajustada=

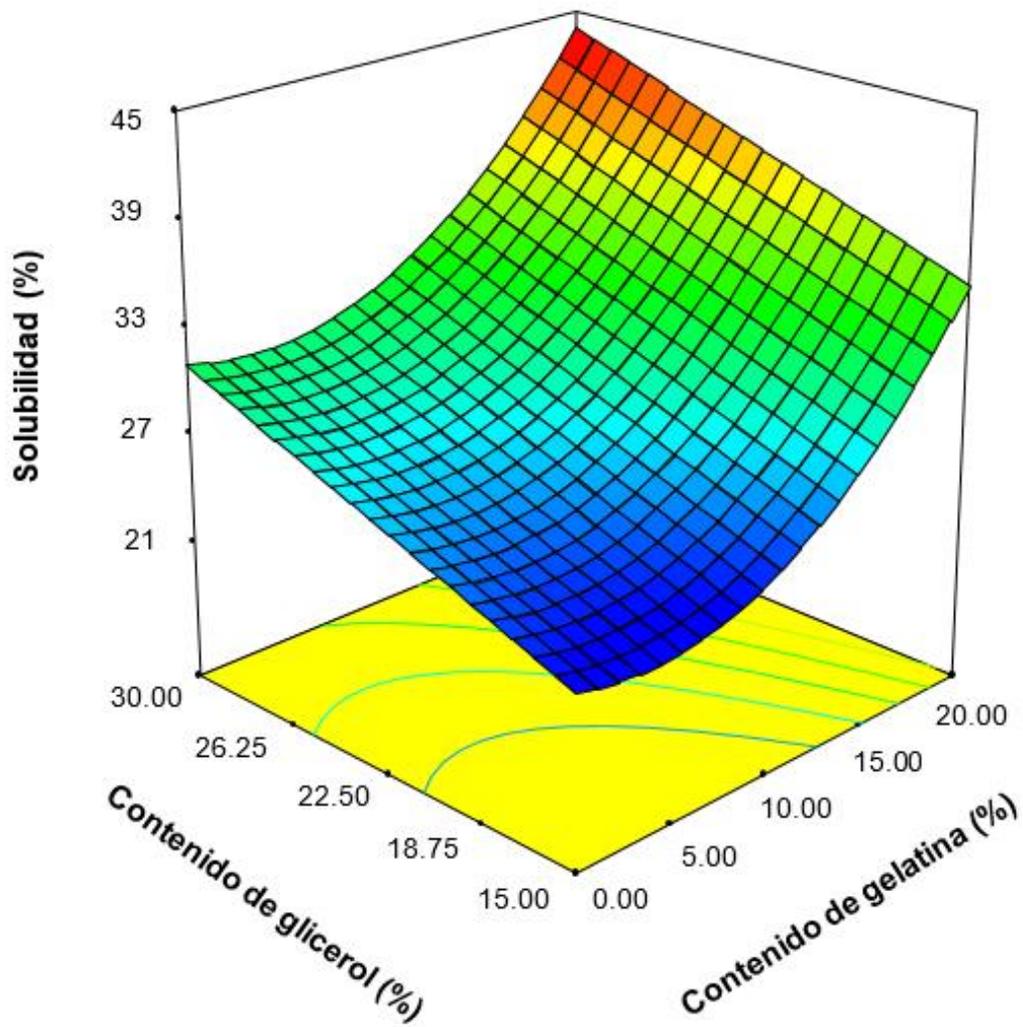
0.82, CV= 7.43 % y p de F=0.0003. En la siguiente ecuación se muestra el modelo matemático para solubilidad:

$$S = + 28.33 + 4.57 CG + 3.01 CP + 2.48 CG^2$$

Se presenta en la **Figura 14** el comportamiento de la solubilidad de las películas comestibles con respecto al contenido de gelatina y al contenido de plastificante. El factor que más influyó en el comportamiento de la solubilidad en películas fue el contenido de gelatina. Se muestra un incremento en la variable de respuesta derivado del aumento del contenido de gelatina. La solubilidad involucra la penetración de las moléculas de agua en la matriz polimérica, esto es seguido por la disrupción de las fuerzas de Van der Waals entre las cadenas poliméricas (Aguilar-Méndez y col 2012).

Se obtuvieron valores de S de 22.63 - 42.12 %, los cuales son menores a lo reportado por Valenzuela-Navarro (2016) para películas comestibles elaboradas a partir de una formulación extrudida de almidón de maíz y gelatina, quien presenta valores de S de 66.29 – 80.50 %; y a los obtenidos por Hosseini y col (2013), quienes presentan valores de S de 29.96 – 63.81 % para películas comestibles elaboradas a base de gelatina de pescado y quitosano. Estos autores reportan un aumento en esta variable de respuesta al incrementar el contenido de gelatina en la formulación de las películas, comportamiento similar al obtenido en el presente trabajo.

Por su parte, Fakhouri y col (2015) obtuvieron valores altos de solubilidad con el aumento en la concentración de gelatina en películas compuestas de almidón-gelatina. Señalan que teniendo en cuenta su naturaleza hidrofílica, al aumentar el contenido de gelatina en la formulación, las películas pueden absorber mayores cantidades de agua



**Figura 14.** Efecto del contenido de gelatina y glicerol sobre la solubilidad de películas comestibles elaboradas a partir de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol.

y por consiguiente, aumenta la solubilidad. McHugh y col (1993) informaron que debido a que la gelatina contiene una amplia gama de aminoácidos hidrofílicos, las películas con mayor cantidad de proteína y espesor podrían absorber más moléculas de agua del medio ambiente. Por lo tanto, es más probable que la película con mayor contenido de proteína sea higroscópica, en comparación con la que contiene el menor contenido de proteína.

De igual forma, se aprecia un incremento en la S, conforme el contenido de glicerol aumenta. De acuerdo con los resultados obtenidos por Aguilar-Méndez y col (2012), la concentración de glicerol presentó gran importancia en la solubilidad de las películas. Debido a que es una molécula hidrófila, ésta es compatible con los biopolímeros que conforman la película, por lo que a mayor concentración de glicerol, la solubilidad de la película aumentó. De acuerdo a Matta y col (2011), la adición de plastificantes, en especial glicerol, tiene una gran influencia sobre la solubilidad de las películas de almidón, debido a su carácter hidrofílico; el glicerol interactúa con la matriz polimérica incrementando el espacio entre las cadenas, lo que facilita la difusión de agua, y por consecuencia incrementa la solubilidad de la película.

Chiumarelli y Hubinger (2014) obtuvieron un valor alto en la S con el aumento en el contenido de glicerol en su formulación. Estos autores atribuyen este aumento en la solubilidad de las películas a que el glicerol es muy higroscópico. Resultados similares obtuvieron Franco y col (2017) en películas de almidón modificado y gelatina, quienes observaron un incremento en la solubilidad en agua al utilizar glicerol en su formulación. Saberi y col (2017) encontraron que una mayor concentración de glicerol aumentó la solubilidad en agua en películas de almidón y goma guar, concluyendo que

el plastificante disminuyó la red del polímero con enlaces de hidrógeno, aumentando la solubilidad de la película en agua.

A pesar de que la gelatina y el plastificante utilizados son de carácter hidrofílico y se observa un aumento en la solubilidad, se obtuvieron valores relativamente más bajos que en estudios previos. Esto es debido a la presencia del almidón acetilado en la formulación de las películas; la modificación del almidón le confiere hidrofobicidad a la molécula, lo que permite una disminución en la  $S$ . Zamudio-Flores y col (2007) obtuvieron los valores más bajos de solubilidad en películas comestibles obtenidas a partir de almidón acetilado; ellos reportan que la acetilación disminuyó valor de solubilidad de las películas debido al carácter hidrofóbico impartido por este tipo de modificación, al sustituir los grupos hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) de las unidades de glucosa del almidón por grupos éster hidrófobos ( $\text{CO}^-$ ) del anhídrido acético.

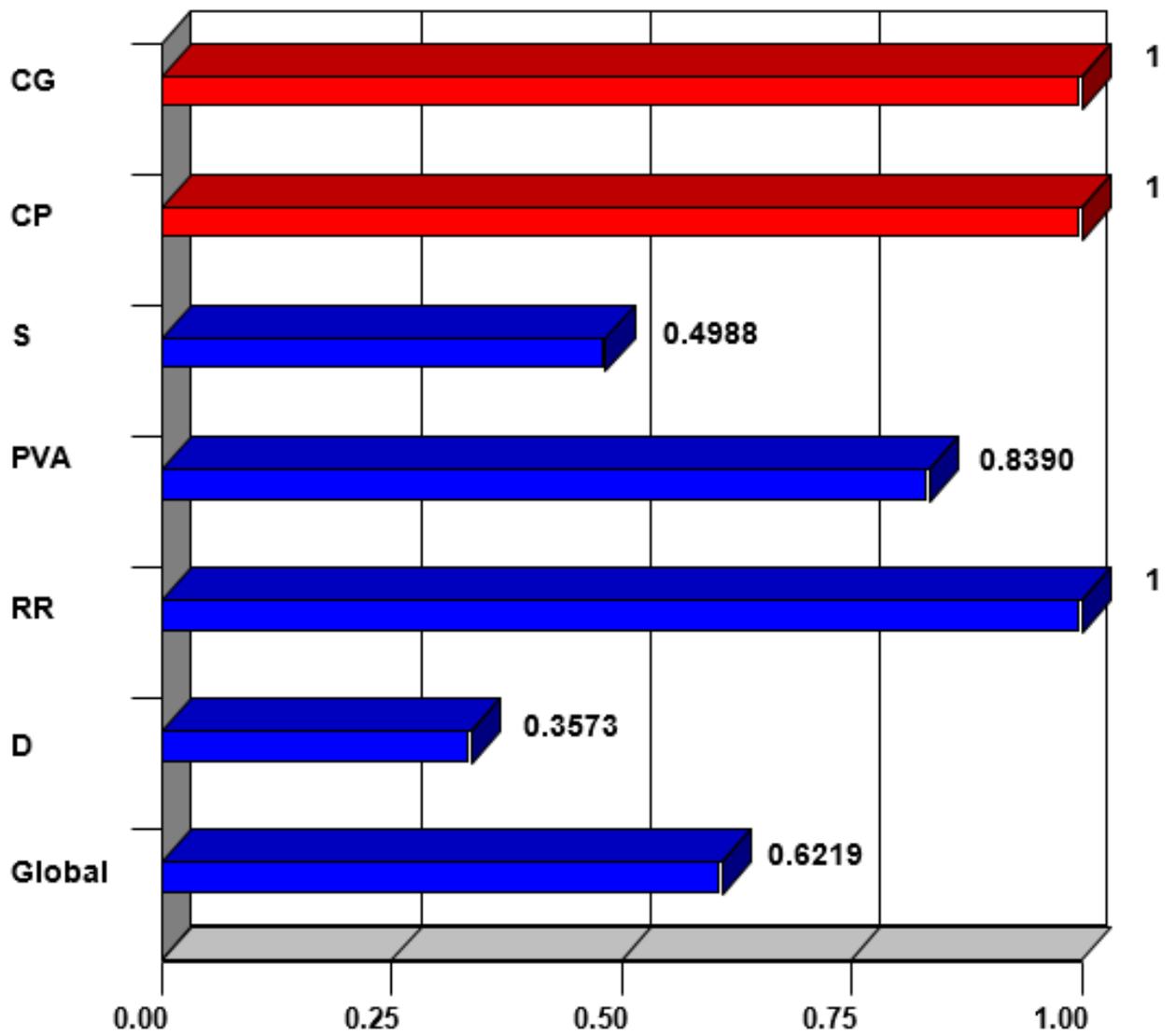
## 2 Optimización

Se realizó una optimización numérica de las variables de respuesta para determinar las mejores condiciones de contenido de gelatina y glicerol para obtener películas comestibles con buenas propiedades mecánicas y de barrera. Se establecieron diferentes criterios para cada una de las variables de respuesta (**Cuadro 7**); buscando valores altos de resistencia a la ruptura y deformación y bajos de permeabilidad al vapor de agua y solubilidad. Estas variables fueron utilizadas debido a que las propiedades mecánicas y de barrera determinan la estabilidad de las películas comestibles a los cambios físicos y ambientales. La **Figura 15** muestra las gráficas de barras de deseabilidad individual de cada una de las variables de respuesta y la deseabilidad global o combinada del proceso. La deseabilidad máxima es de 1 y

**Cuadro 7.** Criterios y límites para la optimización.

<b>Nombre</b>	<b>CG<sup>a</sup></b>	<b>CP<sup>a</sup></b>	<b>RR<sup>b</sup></b>	<b>D<sup>b</sup></b>	<b>PVA<sup>b</sup></b>	<b>S<sup>b</sup></b>
<b>Objetivo</b>	Rango	Rango	Máximo	Máximo	Mínimo	Mínimo
<b>Límite inferior</b>	0	15	7.42	4.81	1.57x10 <sup>-11</sup>	22.63
<b>Límite superior</b>	20	30	22.25	17.00	4.21x10 <sup>-11</sup>	42.12
<b>Importancia</b>	3	3	3	3	3	3
<b>Peso</b>	1	1	1	1	1	1

<sup>a</sup> Factores: Contenido de gelatina (CG), Contenido de glicerol (CP). <sup>b</sup> Variables de Respuesta: Resistencia a la Ruptura (RR), Deformación (D), Permeabilidad al Vapor de Agua (PVA), Solubilidad (S).



**Figura 15.** Deseabilidad individual y global de las variables de proceso y respuestas analizadas durante la optimización.

la deseabilidad mínima es de 0. Se puede observar que la deseabilidad individual tanto de contenido de gelatina como la de contenido de glicerol fueron de 1.0, debido a que durante sus criterios se les asignó como objetivo rango, lo que indica que siempre darán una deseabilidad de 1.

La RR mostró una deseabilidad de 1, indicando con ello que abarcó totalmente la diferencia del límite superior menos el límite inferior de la RR. La D mostró una deseabilidad de 0.35, lo cual representa que alcanzó aproximadamente el 35 % de la diferencia del límite superior menos el límite inferior de D. La respuesta de PVA presentó una deseabilidad de 0.83, indicando con ello que abarcó el 83 % de la diferencia del límite superior menos el límite inferior de PVA. En el caso de la solubilidad, esta mostró una deseabilidad de 0.49 indicando que alcanzó aproximadamente el 49 % de la diferencia del límite superior menos el límite inferior de solubilidad. La deseabilidad global (DG) o combinada está presentada por la siguiente fórmula:  **$DG = (d_1 d_2 \dots d_m)^{1/m}$** . Dónde: d1 representa el valor de deseabilidad de las respuestas independientes y m es el número de respuestas.

$$DG = (1 * 0.35 * 0.83 * 0.49)^{1/4}, DG = 0.62$$

Los valores obtenidos en la optimización numérica fueron los siguientes: CG de 17.99 % y CP de 15 %. Con estas condiciones óptimas se obtuvieron los siguientes valores predichos por cada uno de los modelos matemáticos correspondientes: RR= 23.12 N, D= 9.17 mm, PVA=  $1.99 \times 10^{-11}$  g/Pa s m y S= 32.41 %.

Para efectuar la validación de los modelos empleados, se preparó la formulación de almidón acetilado, gelatina y glicerol utilizando las condiciones óptimas obtenidas.

Con dicha formulación, se elaboraron las películas comestibles óptimas y se caracterizaron para comprobar los valores predichos.

De la caracterización fisicoquímica de las películas comestibles óptimas se obtuvieron los siguientes valores promedio y sus desviaciones estándar:  $RR= 23.15 \pm 6.8$  N,  $D= 7.6941 \pm 3.5$  mm,  $PVA= 2.12 \times 10^{-11} \pm 3.89 \times 10^{-12}$  g/Pa s m y  $S= 28.26 \pm 4.21$  %. Al contrastar los valores experimentales contra los valores predichos por los modelos matemáticos, se observó que no hubo diferencia significativa entre ellos ( $p>0.05$ ). Por tanto, el modelo empleado demostró experimentalmente tener un buen ajuste para encontrar las mejores condiciones de contenido de gelatina y de glicerol para la elaboración de películas comestibles a partir de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol con buenas propiedades mecánicas y de barrera.

## **B VALIDACIÓN DEL EFECTO DE UN RECUBRIMIENTO COMESTIBLE DE ALMIDÓN DE MAÍZ ACETILADO, GELATINA Y GLICEROL SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD EN UN FRUTO MODELO**

En el **Cuadro 8** se presentan los valores promedio obtenidos en la evaluación de los parámetros de calidad de frutos de mango cv. Haden al momento de su cosecha; los cuales fueron tomados como referencia en la comparación de los resultados obtenidos en la evaluación.

Los valores obtenidos son similares a lo reportado por Siller-Cepeda y col (2009) para valores iniciales de mangos cv. Haden almacenados durante 20 días a 20°C y por Carrera y col (2008) para mangos de la misma variedad.

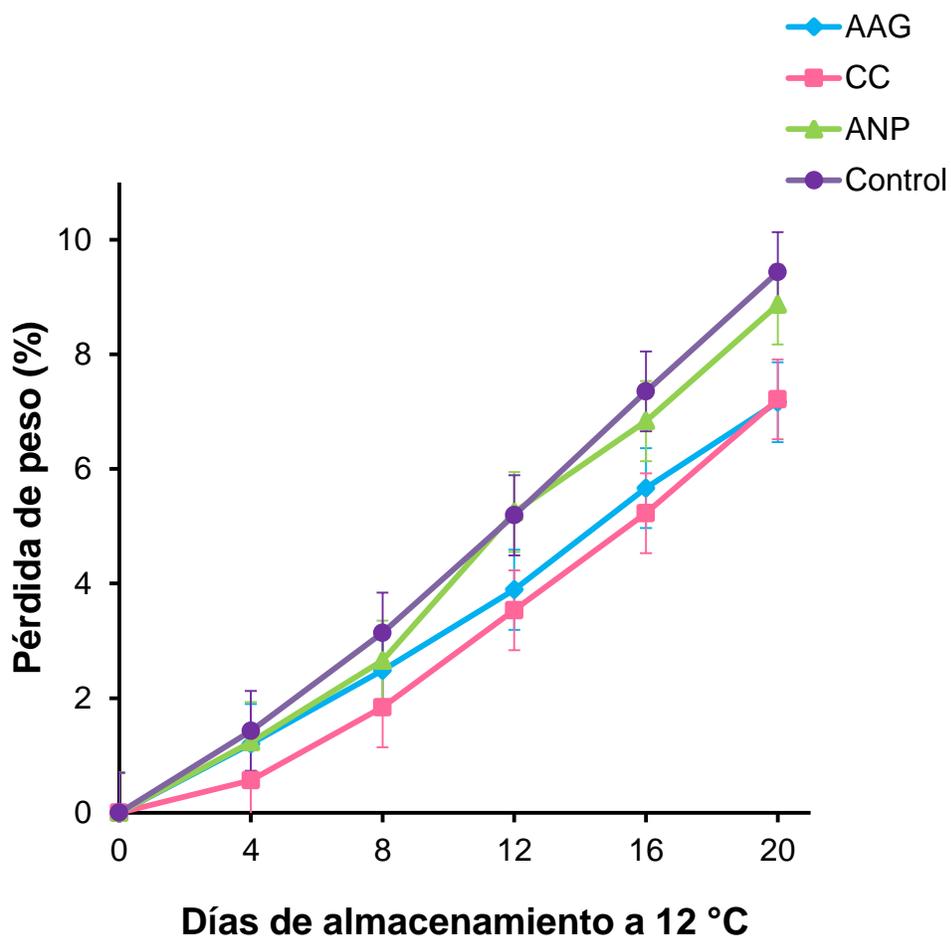
### **1 Análisis físicos**

#### **a Pérdida de peso**

En la **Figura 16** se muestra el porcentaje de pérdida de peso (%PP) de los frutos de mango evaluados con respecto a los días de almacenamiento obtenido de las mediciones realizadas cada 4 días. Se puede observar que todos los frutos perdieron peso de manera constante durante el tiempo de almacenamiento. La pérdida fisiológica de peso en los frutos se asocia, principalmente, con la transpiración y es propia de cada vegetal, la velocidad de la pérdida de agua depende del gradiente de presión entre el tejido de la fruta, la atmósfera circundante y la temperatura de almacenamiento. Diferencias de presión de vapor baja entre la fruta y sus ambiente externo y temperatura de refrigeración son las condiciones más recomendables para el almacenamiento de las frutas, entre ellas, el mango (Hernández- Muñoz y col 2008).

**Cuadro 8.** Valores promedio de los parámetros físicos y químicos obtenidos al momento de la cosecha de frutos de mango cv. Haden.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor inicial<sup>a</sup></b>
<b>Físicos</b>	
<b>Peso (g)</b>	457.85 ± 64.31
<b>Firmeza (N)</b>	67.39 ± 2.14
<b>Color externo</b>	
<b>L*</b>	95.94 ± 3.71
<b>a*</b>	-6.17 ± 7.24
<b>b*</b>	0.51 ± 10.28
<b>Color interno</b>	
<b>L*</b>	98.44 ± 5.53
<b>a*</b>	-2.04 ± 6.52
<b>b*</b>	0.84 ± 33.83
<b>Químicos</b>	
<b>pH</b>	3.08 ± 0.11
<b>Acidez Titulable (% Ácido Cítrico)</b>	0.899 ± 0.25
<b>SST (°Brix)</b>	9.720 ± 1.44



**Figura 16.** Porcentaje de pérdida de peso de frutos de mango cv. Haden almacenados durante 20 días a  $12 \pm 1$  °C. Las barras verticales representan  $LSD = 0.69\%$  ( $\alpha = 0.05$ ).

El tratamiento que presentó una menor pérdida de peso final fue el de AAG con una pérdida del  $7.17 \pm 0.23$  %, presentando diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) con el tratamiento Control del día 16 al 20 y con el tratamiento ANP al final del experimento. Esto se puede atribuir a la modificación química por acetilación, ya que la introducción de grupos hidrofóbicos en la molécula del almidón, le confiere una menor afinidad al agua y por lo tanto una mayor barrera contra la transferencia de humedad. Así mismo la interacción de la gelatina con los demás componentes pudo contribuir a la formación de una película más fuerte y menos permeable.

El tratamiento CC tuvo un %PP de  $7.21 \pm 0.92$ , mostrando diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) con respecto a los tratamientos Control y ANP del día 14 al 20. Sin embargo, no presentó diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) con respecto al tratamiento AAG. Esto se puede atribuir a que la cera de carnauba es un compuesto hidrofóbico, por lo que le permite actuar como una buena barrera contra la pérdida de agua.

Los tratamientos Control y ANP presentaron un comportamiento similar durante los 20 días de almacenamiento, con %PP de  $9.44 \pm 0.63$  y  $8.87 \pm 1.14$  respectivamente, siendo el Control el tratamiento que presentó el mayor valor de %PP. Este comportamiento puede ser atribuido a la naturaleza hidrofílica tanto del almidón, como del plastificante, ya que al tener una mayor afinidad al agua provee una barrera pobre contra la pérdida de humedad.

Resultados similares se han reportado por diferentes investigadores; Franco y col (2017) evaluaron la pérdida de peso en fresas recubiertas con una solución de almidón acetilado, gelatina y glicerol, observando diferencia significativa entre los frutos recubiertos y el Control (frutos sin recubrir), siendo éste último tratamiento el que

presentó mayor %PP. Resultados similares obtuvieron Aguilar-Méndez y col (2008) quienes aplicaron un recubrimiento de gelatina y almidón. Ellos reportaron que la pérdida de peso fue mayor en los frutos Control que en los frutos recubiertos, indicando que estos recubrimientos funcionan eficientemente como barreras al vapor de agua.

Con respecto al comportamiento presentado por CC, resultados similares fueron encontrados por Baldwin y col (1999), quienes aplicaron cera de carnauba y un recubrimiento a base de polisacáridos para recubrir mangos cv. Tommy Atkins, encontrando que el recubrimiento a base de polisacáridos resultó más permeable al vapor de agua y que el recubrimiento de cera de carnauba redujo significativamente la pérdida de agua en comparación con el tratamiento a base de polisacáridos y el Control (frutos sin recubrir), lo cual fue atribuido a que es un compuesto hidrofóbico y por lo tanto presenta una buena barrera al vapor de agua. Resultados similares fueron encontrados por Hoa y col (2001) quienes reportaron que la cera de carnauba fue el tratamiento más efectivo para reducir la pérdida de peso en frutos de mango cvs. Kent, Tommy Atkins y Lirfa; y por Velasco-Ulloa (2012) en mangos recubiertos por una cera comestible. La menor pérdida de peso observada para los recubrimientos de cera es atribuida a las buenas propiedades de barrera a la transmisión de agua que presentan los recubrimientos lipídicos, debido a la naturaleza hidrofóbica de sus constituyentes.

En relación a al comportamiento obtenido para ANP, resultados similares fueron obtenidos por Figueroa y col (2013), quienes aplicaron un recubrimiento de almidón nativo de yuca en mangos cv. Tommy Atkins; obteniendo una disminución en la pérdida de peso en los frutos recubiertos en comparación con los frutos sin recubrir, lo que indica que estos recubrimientos pueden reducir la pérdida de agua, atribuyéndose

a las propiedades de barrera de gases que retarda la difusión del vapor de agua entre el fruto y el medio exterior. Por otro lado, Campos y col (2011b) reportan una pérdida de peso similar en fresas recubiertas con un tratamiento de almidón nativo de yuca y el tratamiento control, no encontrando diferencia significativa; lo que concuerda con el presente trabajo.

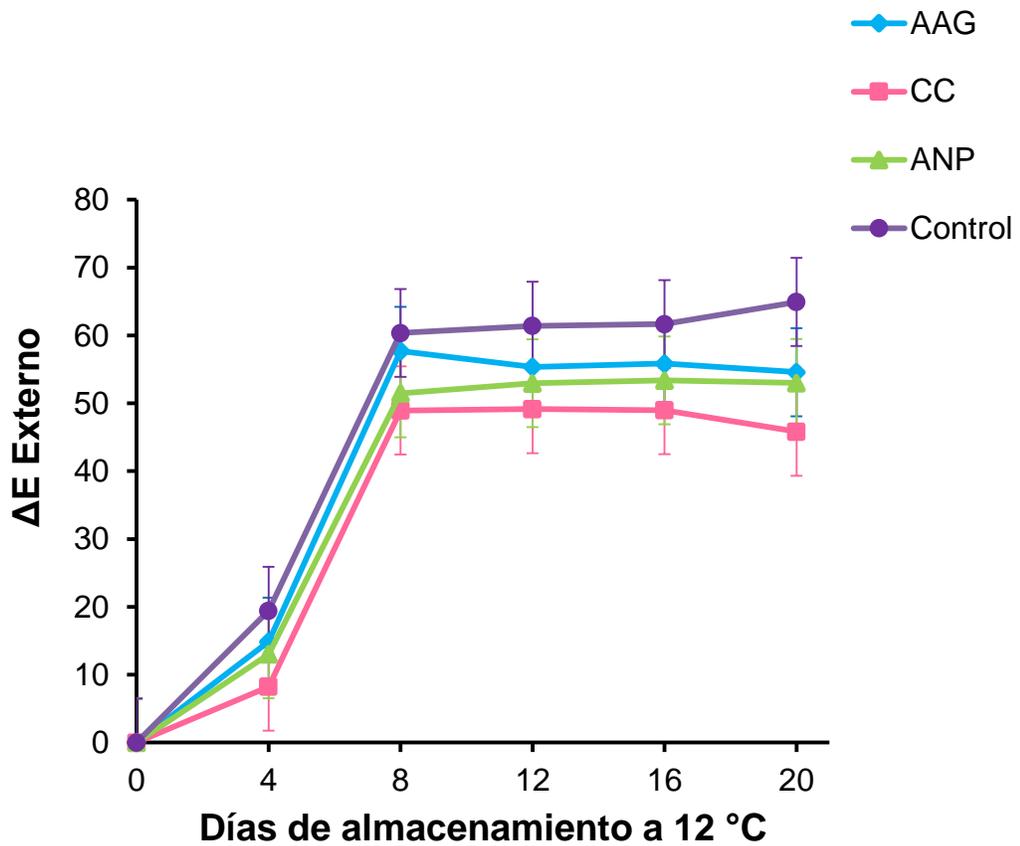
Las diferencias en la capacidad de estos recubrimientos para reducir la pérdida de peso podrían atribuirse a diferencias en las características de permeabilidad, lo que a su vez podría ser debido a diferencias en la naturaleza química de los polímeros y su concentración relativa.

## **b Color externo**

El color es el cambio más obvio que se presenta en muchos frutos y es a menudo, el principal criterio utilizado por los consumidores para determinar si un fruto está maduro o no. Los cambios de color durante la maduración de la mayoría de los frutos, son producto principalmente de la degradación de la clorofila y la síntesis de pigmentos tales como carotenoides y antocianinas (Wills 2016).

En la **Figura 17** se muestran los resultados para la diferencia total de color externo ( $\Delta E$ ) de frutos de mangos cv. Haden almacenados durante 20 días a  $12 \pm 1$  °C. La diferencia de color total ( $\Delta E$ ), que es una combinación de los parámetros L,  $a^*$  y  $b^*$ , es un parámetro colorimétrico ampliamente utilizado para caracterizar la variación en la percepción del color.

Se observó un aumento constante en  $\Delta E$  en todos los tratamientos durante los 20 días de almacenamiento, teniendo un aumento marcado en el día 4, alcanzando



**Figura 17.** Diferencia total de color externo de frutos de mango cv. Haden almacenados durante 20 días a  $12 \pm 1$  °C. Las barras verticales representan  $LSD = 6.48\%$  ( $\alpha = 0.05$ ).

valores de 60.37, 57.72, 51.46 y 48.94 en Control, AAG, ANP y CC, respectivamente. La diferencia de color total en las muestras recubiertas fue siempre menor que en el tratamiento Control, por lo tanto, se puede reconocer que los recubrimientos comestibles tienen un efecto beneficioso sobre la reducción de los cambios de color.

A partir del día 8 se observa un comportamiento constante para todos los tratamientos. Los tratamientos CC y ANP mostraron un comportamiento similar, sin embargo no presentaron diferencia significativa entre ellos. El tratamiento CC presentó diferencia significativa ( $p < 0.5$ ) con el tratamiento Control el día 20. Por su parte el tratamiento AAG y Control mostraron un comportamiento similar, no obstante, no mostraron diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre ellos. El día 20 de almacenamiento se presentó diferencia significativa entre el tratamiento Control y el tratamiento CC, alcanzando valores de 16.48, 16.29, 14.61 y 14.11 para Control, AAG, ANP y CC, respectivamente. El tratamiento que obtuvo el mayor  $\Delta E$  fue el Control, mientras que el tratamiento CC fue el que alcanzó el menor cambio de color con respecto al valor inicial.

Resultados similares fueron encontrados por Maftoonazad y col (2007), quienes encontraron menores valores de  $\Delta E$  en aguacates recubiertos con una formulación de pectina, cera de abeja y sorbitol, que en los frutos Control (no recubiertos), y mencionan que los menores cambios de color en los frutos recubiertos pueden estar relacionados con el efecto del recubrimiento en la creación de atmósferas modificadas dentro del fruto, ya que la presencia de  $CO_2$  en la atmósfera de almacenamiento es un factor importante para prevenir la degradación de la clorofila y la síntesis de carotenoides.

Por su parte, Aguilar-Méndez y col (2008) reportan una mejor retención del color en frutos de aguacate recubiertos con una solución a base de gelatina-almidón, resultado de la atmósfera modificada creada por los recubrimientos. En general las películas a base de proteína son barreras excelentes al oxígeno, dióxido de carbono y algunos aromas (Gennadios y col 1993).

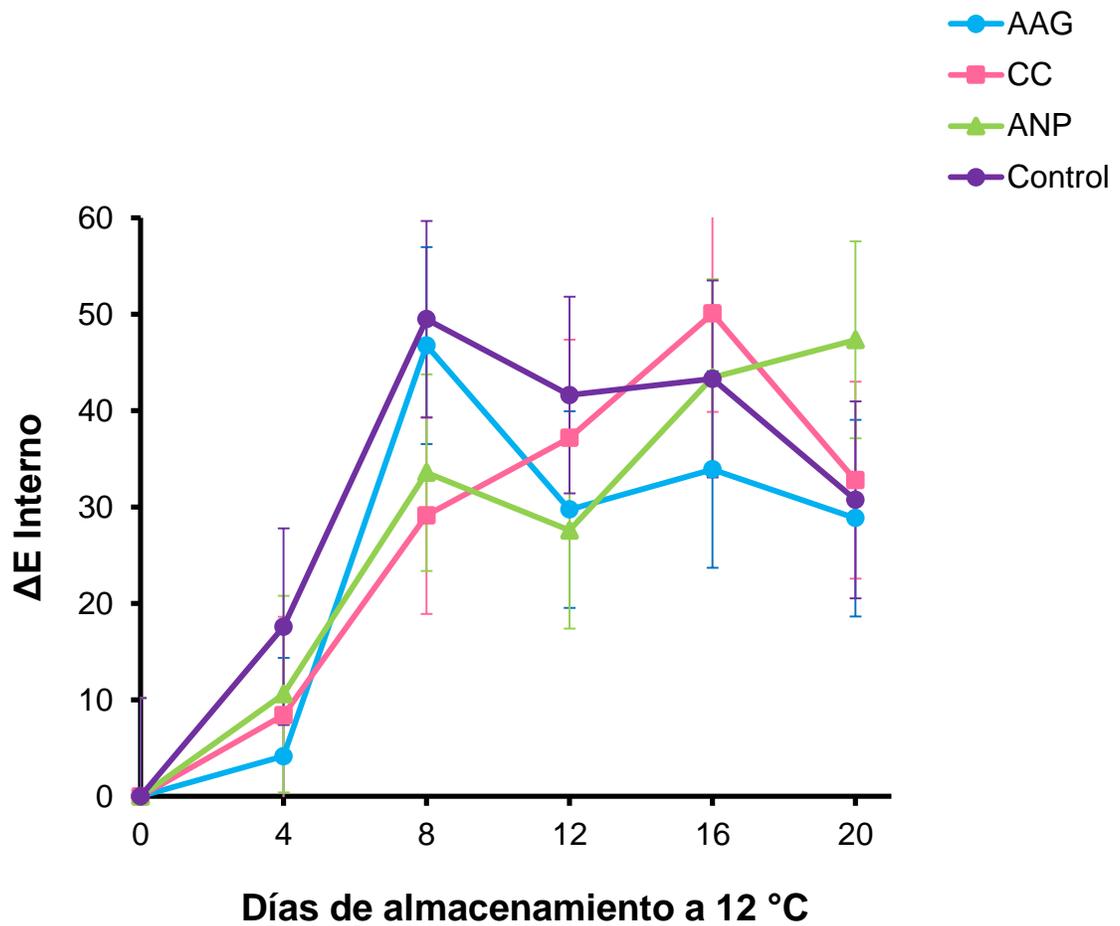
Velasco-Ulloa y col (2012) utilizaron un recubrimiento de cera comestible en frutos de mango, con el cual obtuvieron una reducción en los cambios en la diferencia total de color con respecto a los frutos sin recubrimiento, lo cual atribuyen principalmente a la reducción del metabolismo por acción de la formación de una atmósfera modificada. Del mismo modo Velickova y col (2013) aplicaron un recubrimiento a base de quitosano y cera de abeja en fresas, encontrando que los cambios de color más notables durante el almacenamiento ocurrieron en las muestras Control, debido a la ausencia del recubrimiento que actuaba como barrera protectora; por lo que a falta de éste, se aceleró la senescencia del fruto, aumentó la respiración y dio lugar a algunos procesos enzimáticos que causaron el oscurecimiento de los frutos Control (no recubiertos).

Nadim y col (2014) aplicaron un recubrimiento comestible a base de metilcelulosa en fresas, obteniendo como resultado, menores cambios de color en comparación a los frutos Control (frutos sin recubrir); lo cual se debió a la reducción tanto en la tasa de respiración, como en algunos procesos enzimáticos que ayudaron al mantenimiento del color y la calidad del fruto.

### c Color interno

Se determinó la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) en pulpa de frutos de mango. En general, se observó un incremento de  $\Delta E$  para todos los tratamientos durante el tiempo de almacenamiento (**Figura 18**), debido al cambio de color por la maduración de los frutos. Se obtuvieron valores mayores de  $\Delta E$  interno, en comparación con los valores obtenidos en  $\Delta E$  externo, debido a que los cambios de color durante la maduración de los frutos, ocurre desde el interior hacia el exterior; siendo más intenso el color en pulpa que en cáscara. El día 4 se muestra un incremento marcado en todos los tratamientos, obteniendo valores de  $\Delta E$  de 29.13 a 49.48. En el día 8 se observa una disminución en los tratamientos control, AAG y ANP, y un aumento en  $\Delta E$  de CC obteniendo un valor de 37.17. Para el día 12 se observó nuevamente un incremento en la tendencia de todos los tratamientos, obteniendo valores de  $\Delta E$  de 33.91 a 50.07. El día 16 muestra una nueva disminución en los valores de  $\Delta E$ , obteniendo valores finales de 28.86 a 47.34. Aunque las tendencias de maduración fueron similares, estadísticamente no existieron diferencias entre ninguno de los tratamientos.

El tratamiento AAG fue el que presentó el mejor valor de diferencia total de color (28.86) en pulpa de frutos de mango, lo que demuestra que hubo un retraso en el proceso de maduración en los frutos recubiertos con este tratamiento. Velickova y col (2013) y Hoa y col (2001) obtuvieron menores valores de diferencia total de color interno en frutos recubiertos en comparación de los frutos no recubiertos. Lo cual es similar a lo obtenido en este trabajo solo para el tratamiento AAG, ya que los demás tratamientos obtuvieron mayores valores finales que el control. Lo anterior puede deberse a la formación de una atmósfera modificada en el interior del fruto.



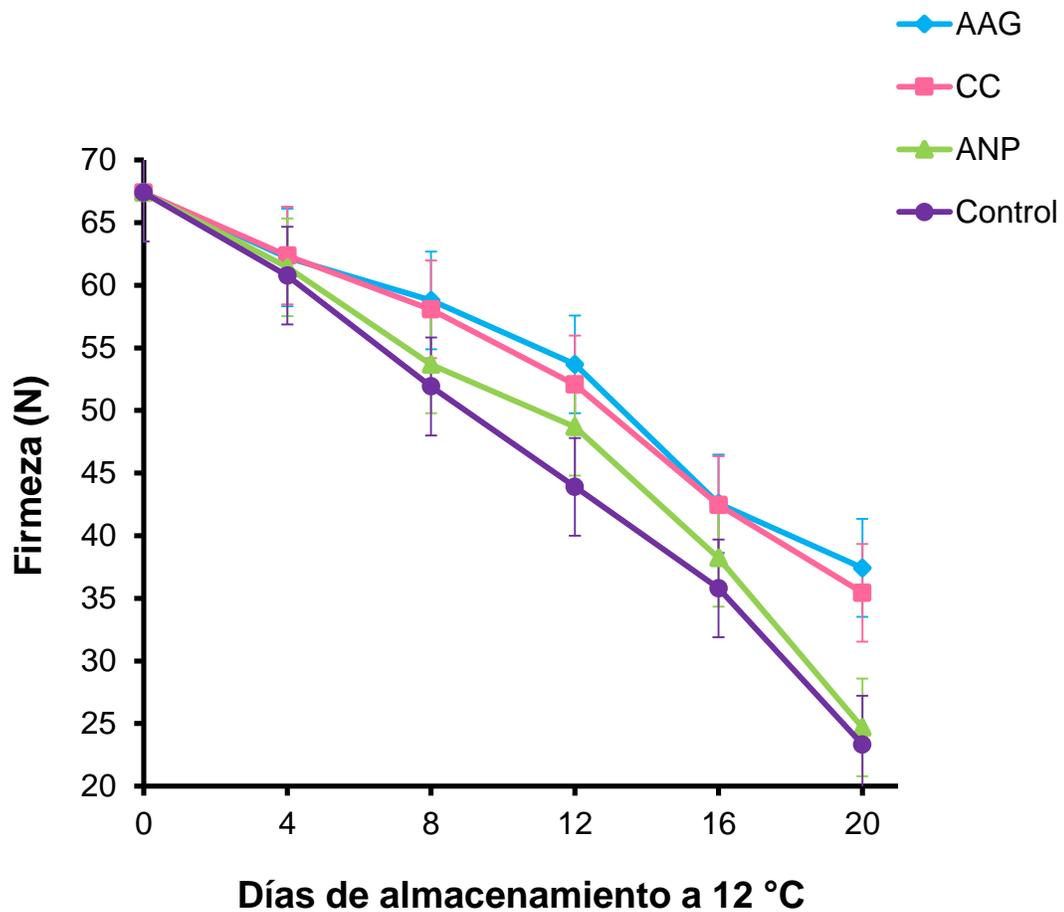
**Figura 18.** Diferencia total de color interno de frutos de mango cv. Haden almacenados durante 20 días a  $12 \pm 1$  °C. Las barras verticales representan  $LSD = 10.20\%$  ( $\alpha = 0.05$ ).

#### **d Firmeza**

En la **Figura 19** se presentan los resultados de firmeza (expresada en Newtons) de frutos de mango cv. Haden almacenados a  $12 \pm 1$  °C por 20 días, el valor promedio de firmeza al momento de la cosecha fue de  $67.39 \pm 2.01$  N. Se observa una pérdida constante de firmeza en todos los tratamientos durante el periodo de almacenamiento; mostrando una ligera disminución de los días 4 al 16 obteniéndose valores para este día de  $35.80 \pm 3.84$ ,  $38.23 \pm 7.46$ ,  $42.46 \pm 5.02$  y  $42.57 \pm 4.19$  N para los tratamientos Control, ANP, CC y AAG respectivamente. Esta disminución se observa de manera más notoria en el tratamiento Control en todos los días de almacenamiento.

El ablandamiento o pérdida de firmeza de la pulpa de las frutas, se debe a la degradación de las pectinas y de las hemicelulosas de las paredes celulares, y en ella, intervienen procesos de hidrólisis enzimática y procesos no enzimáticos, como los cambios del pH o fuerza iónica del medio que envuelve la pared celular. Una refrigeración adecuada y el uso de atmósferas modificadas o controladas, ralentiza los procesos de senescencia del fruto en general, y el ablandamiento de la pulpa en particular (Navarro-Tarazaga 2007).

El tratamiento Control presentó los valores menores de firmeza, alcanzando un valor de  $23.33 \pm 5.78$  N. Este tratamiento presentó diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) con los tratamientos AAG y CC los días 12 y 20 de almacenamiento, con valores de  $37.43 \pm 3.45$  y  $35.45 \pm 5.28$  N, respectivamente. Por su parte, el tratamiento AAG también presentó diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) con el tratamiento ANP el día 20 y a su vez el tratamiento ANP obtuvo un valor de  $24.69 \pm 3.07$  N, presentando diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) con el tratamiento CC el mismo día. El tratamiento Control fue el



**Figura 19.** Firmeza de frutos de mango cv. Haden almacenados durante 20 días a  $12 \pm 1$  °C. Las barras verticales representan  $LSD = 3.9\%$  ( $\alpha = 0.05$ ).

que presentó la mayor pérdida de firmeza, mientras que el tratamiento que tuvo la mayor retención de firmeza en los frutos de mango durante el periodo de almacenamiento fue AAG, con un valor final de  $37.43 \pm 3.45$  N. Esto puede ser debido a que los recubrimientos de gelatina reducen la permeabilidad al oxígeno (Krochta y De Mulder-Johnston 1997); se ha observado que ambientes con concentraciones bajas en  $O_2$  y altas en  $CO_2$ , reducen la actividad enzimática causante de la degradación de las paredes celulares, permitiendo así la retención de la firmeza de frutas y vegetales durante su vida poscosecha (Yaman y Bayoindirli 2002).

Franco y col (2017) estudiaron el efecto de recubrimientos comestibles a base de gelatina y almidón nativo o modificado. Ellos observaron una disminución constante de la firmeza en los frutos Control, comportamiento esperado debido a que es una tendencia natural del tejido vegetal a lo largo del tiempo. Durante el proceso de maduración, la celulosa, la hemicelulosa y la pectina, que forman la pared celular, se hidrolizan y se obtienen productos solubles. Por lo tanto, durante la maduración de la fruta se produce una disminución de la firmeza de la fruta con un aumento en las actividades de poligalacturonasa, celulasa y pectinesterasa. Para los frutos recubiertos, se observaron mayores valores de firmeza en los tratados con el recubrimiento comestible a base de almidón acetilado, gelatina y glicerol, en comparación con los frutos recubiertos con almidón nativo y el tratamiento Control.

Aguilar-Méndez y col (2008) obtuvieron una disminución en la firmeza de la pulpa al aumentar el tiempo de almacenamiento tanto en los frutos de aguacate recubiertos con una formulación a base de gelatina-almidón, como en los frutos sin recubrir. Sin embargo, observaron una mejora en la retención de la firmeza de la pulpa en los frutos

recubiertos en comparación con los aguacates sin recubrimiento. Ellos reportan que el ablandamiento tisular se atribuye a la degradación de los componentes de la pared celular (pectinas), como resultado de la actividad de enzimas tales como pectinesterasa y poligalacturonasa. Estas modificaciones celulares provocan la pérdida de agua, que también se considera un factor importante para los cambios de textura en frutos. Se ha demostrado que el almacenamiento en atmósferas con bajas concentraciones de O<sub>2</sub> y altas de CO<sub>2</sub> reduce la actividad enzimática de la fruta, lo que resulta en una mejor retención de la firmeza.

Trejo-Márquez y col (2007) reportan que la firmeza de los frutos de fresa recubiertos con una formulación a base de gelatina, al igual que los frutos no recubiertos, presentaron una disminución a lo largo del almacenamiento; presentando mayores valores de firmeza en los frutos recubiertos con la formulación elaborada con la mayor concentración de gelatina. La influencia de la concentración de la gelatina en la retención de la firmeza lo atribuyeron a que un polímero de cadena lineal poco compacto forma un recubrimiento de baja funcionalidad, mientras que un polímero con elevado número de ramificaciones incrementa el nivel de cohesividad de los recubrimientos a medida que aumenta su concentración en la dispersión. Este efecto repercute en la funcionalidad de los recubrimientos al inducir la formación de estructuras resistentes.

Por su parte Achipiz y col (2013) aplicaron un recubrimiento a base de almidón en frutos de guayaba, encontrando que los frutos recubiertos obtuvieron una mayor resistencia mecánica que los frutos Control (no recubiertos). Estos autores reportan que la concentración de almidón del recubrimiento fue inversamente proporcional a la

pérdida de firmeza. El comportamiento observado en los frutos, lo relacionaron con la formación de una barrera superficial en el fruto generada por el recubrimiento, modificando la composición gaseosa interna, lo cual disminuye la tasa de respiración y la degradación de los compuestos de la pared celular, manteniendo su condición inicial medida en la oposición que ejerce el tejido a ser penetrado. Así mismo Estrada-Mesa y col (2015) reportan una disminución de la pérdida de firmeza en frutos de mango recubiertos por soluciones a base de almidón y de pectina cítrica, en comparación a los frutos no recubiertos. Resultados similares fueron obtenidos por Ali y col (2010) para frutos de tomate recubiertos con películas de goma arábica y por Kittur y col (2001) para frutos de mango y bananas recubiertos con formulaciones a base de polisacáridos (almidón, celulosa y quitosano).

Por otro lado, Amaya y col (2010) recubrieron tomates con una cera comercial, obteniendo una menor pérdida de firmeza que en los frutos recubiertos con una solución de almidón y los frutos testigo (sin recubrir), esto debido a una maduración lenta, siendo la cera el recubrimiento que menos afectó el desarrollo de la maduración y la firmeza durante el tiempo de almacenamiento. Este resultado fue similar a lo obtenido en esta investigación, ya que el tratamiento CC presentó valores de firmeza mayores a los obtenidos por los tratamientos Control y ANP, y valores muy cercanos a AAG, tratamiento que obtuvo mayor retención de firmeza.

Por su parte, Calderón-Castro y col (2018) obtuvo una mayor retención de firmeza en frutos de mango cv. Tommy Atkins recubiertos con una formulación a base de almidón y glicerol obtenido mediante el proceso de extrusión-casting, en comparación con los frutos no recubiertos. Este autor menciona que esa retención de firmeza se

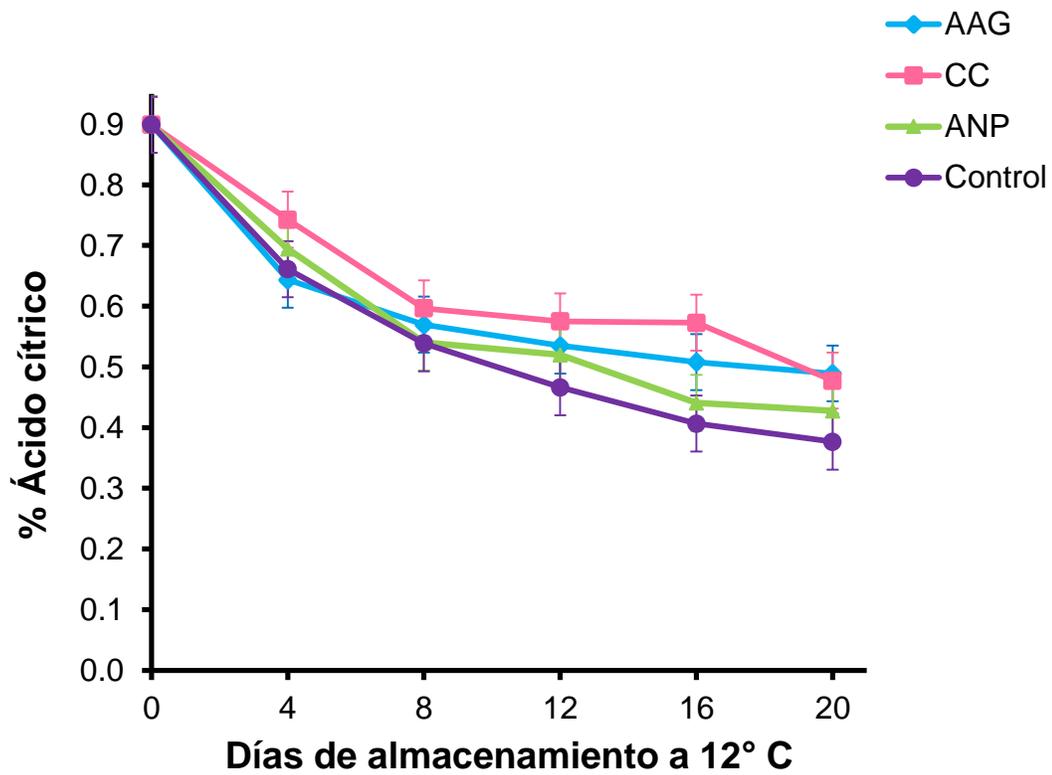
puede atribuir a que el coeficiente de cohesión de las películas de almidón es alto, resultando en fuerzas de atracción altas entre las moléculas de los polímeros, formando con ello una barrera buena a los gases. La permeabilidad baja al oxígeno que presentan las películas de almidón pueden reducir la disponibilidad del oxígeno en la actividad respiratoria, y consecuentemente una velocidad de respiración baja, siendo este, uno de los factores a los que se atribuye la menor pérdida de firmeza en frutos.

## **2 Análisis químicos**

### **a Acidez Titulable**

En la **Figura 20** se presentan los resultados de acidez titulable (AT) de frutos de mango cv. Haden almacenados a  $12 \pm 1$  °C por 20 días, los cuales fueron expresados en % de ácido cítrico. El valor promedio de acidez titulable al momento de la cosecha fue de  $0.899 \pm 0.031$  % de ácido cítrico. La AT decreció durante el periodo de almacenamiento observando una disminución drástica en al día 4, obteniendo valores de  $0.643 \pm 0.016$ ,  $0.695 \pm 0.071$ ,  $0.743 \pm 0.117$  y  $0.661 \pm 0.095$  % de ácido cítrico para AAG, ANP, CC y Control respectivamente. Esta disminución se da debido a la actividad de las deshidrogenasas y a que los ácidos orgánicos son utilizados como sustratos de la respiración para la síntesis de nuevos componentes durante la maduración. Este descenso coincide con el inicio de la maduración y la acumulación de azúcares (Kays 1997).

El tratamiento AAG presentó diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ) con el tratamiento CC el día 4, mientras que los tratamientos AAG, ANP y Control no presentaron diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) para ese día. A partir del día 8 se observa



**Figura 20.** Contenido de ácido cítrico de frutos de mango cv. Haden almacenados durante 20 días a  $12 \pm 1$  °C. Las barras verticales representan  $LSD = 0.04\%$  ( $\alpha = 0.05$ ).

una disminución ligera para los tratamientos AAG, ANP y CC, sin embargo, el tratamiento Control decrece constantemente. El tratamiento ANP presentó diferencia significativa con el tratamiento CC los días 16 al 20 ( $p < 0.05$ ), con los demás tratamientos no se presentó diferencia significativa ( $p > 0.05$ ). El tratamiento CC presentó diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) con AAG el día 4 y con el tratamiento Control el del día 16 al 20, mientras que el tratamiento Control mostró diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) con el tratamiento AAG el día 16 y 20.

Al término de la evaluación, los frutos del tratamiento Control obtuvieron un valor de AT de  $0.377 \pm 0.097$  %, siendo el valor más bajo para esta variable de respuesta. El tratamiento ANP obtuvo un valor de  $0.428 \pm 0.092$  %, mientras que CC presentó un valor de  $0.477 \pm 0.019$  %. Por su parte, el tratamiento AAG fue el que registró el mayor valor de AT con un  $0.489 \pm 0.100$  % de AT. Los valores más altos de AT se relacionan con una disminución en la tasa de respiración de los frutos de mango.

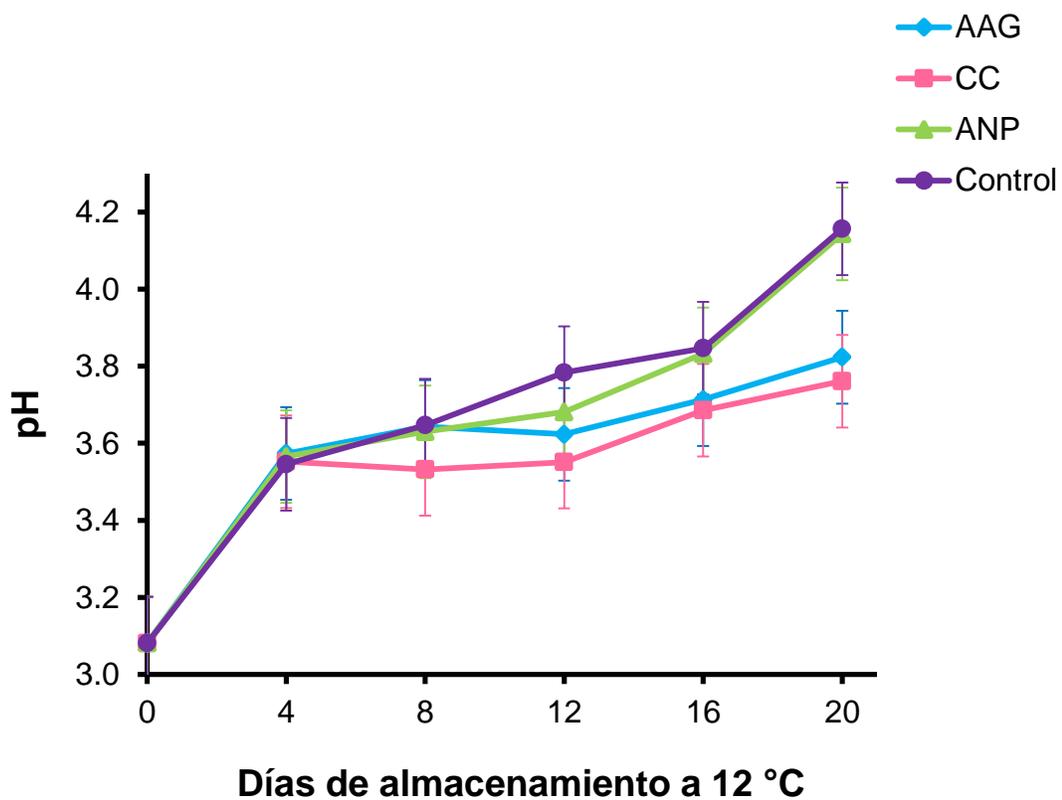
Resultados similares fueron obtenidos por Franco y col (2017) quienes observaron mayores valores de AT en los frutos de fresa tratados con un recubrimiento elaborado a base de gelatina y almidón acetilado, lo cual atribuyeron a que las modificaciones del almidón hicieron el proceso más eficiente el cuarto día, en el que no se observó una disminución de la acidez total, sino un ligero aumento, lo que indica que la película posiblemente retrasó algunas reacciones enzimáticas relacionadas con la maduración. Zapata y col (2008) encontraron que la AT fue significativamente menor en los frutos Control, que en aquellos tratados con recubrimientos a base de zeína y a base de alginato, concluyendo que el uso de estos recubrimientos retardó el proceso de maduración al disminuir la tasa de respiración y la producción de etileno.

Achipiz y col (2013) reportan una menor disminución de AT en frutos de guayaba recubiertos con formulaciones a base de almidón, en comparación de los frutos Control; debido a una menor tasa de respiración y por tanto menor consumo de sustratos de reserva de los frutos recubiertos. Por su parte, Ali y col (2010) encontraron que la AT fue significativamente mayor en frutos tratados con goma arábica en comparación con el Control. Menores valores de AT en los frutos Control en comparación con los frutos recubiertos, sugieren que el recubrimiento pudo retardar el proceso de maduración, proporcionando una película semipermeable alrededor del fruto. Se considera que los recubrimientos reducen la tasa de respiración y, por lo tanto, pueden retrasar la utilización de ácidos orgánicos (Yaman y Bayoindirli 2002).

Figuroa y col (2013) aplicaron recubrimientos de almidón nativo de yuca, almidón oxidado y almidón oxidado con un compuesto lipídico en mangos cv. Tommy Atkins. Estos autores observaron un valor final mayor AT en el tratamiento de almidón oxidado con un compuesto lipídico, en comparación con el Control (frutos sin recubrir), demostrando un retraso en la maduración de los frutos tratados con este recubrimiento.

## **b pH**

En la **Figura 21** se presenta el comportamiento obtenido de pH en frutos de mango cv. Haden almacenados por 20 días a  $12 \pm 1$  °C, teniendo como valor inicial  $3.08 \pm 0.11$ . Se observa un aumento constante para todos los tratamientos, teniendo un aumento marcado en el día 4, alcanzando valores de  $3.55 \pm 0.240$ ,  $3.55 \pm 0.087$ ,  $3.57 \pm 0.176$  y  $3.57 \pm 0.087$  en Control, CC, ANP y AAG, respectivamente. Kays (1997) considera que el pH aumenta al avanzar el proceso de maduración, debido



**Figura 21.** Valores de pH de frutos de mango cv. Haden almacenados durante 20 días a  $12 \pm 1$  °C. Las barras verticales representan  $LSD = 0.12\%$  ( $\alpha = 0.05$ ).

probablemente a que los principales ácidos orgánicos en los frutos disminuyen durante este periodo, por actividad de las hidrogenasas; ácidos que se utilizan en el proceso respiratorio y se emplean en el metabolismo del fruto. Los tratamientos AAG y CC mostraron un comportamiento similar, durante todo el periodo de almacenamiento, sin embargo, no presentaron diferencia estadística significativa ( $p > 0.05$ ) entre ellos. El tratamiento ANP presentó diferencia significativa ( $p < 0.5$ ) con los tratamientos AAG y CC el día 20. Por su parte el tratamiento Control mostró un comportamiento similar al de ANP sin presentar diferencia significativa ( $p > 0.05$ ). El día 20 de almacenamiento se presentó diferencia significativa entre el tratamiento Control y los tratamientos AAG y CC, alcanzando valores de  $4.16 \pm 0.134$ ,  $4.14 \pm 0.056$ ,  $3.82 \pm 0.094$  y  $3.76 \pm 0.130$  para Control, ANP, AAG y CC, respectivamente. El tratamiento que obtuvo el mayor incremento en pH fue el Control, mientras que el tratamiento CC fue el que alcanzó el menor cambio de pH con respecto al valor promedio inicial.

Figuerola y col (2013) reportan que un recubrimiento formulado con almidón modificado y un compuesto lipídico, mostró ser más efectivo en cuanto a la retención en el cambio del pH en los frutos de mango recubiertos con el mismo. Este comportamiento puede ser causado en la inhibición de la actividad metabólica del fruto, relacionada por el efecto positivo del recubrimiento en la extensión del proceso de maduración. Por su parte, Castro y Blair (2010) aplicaron un recubrimiento a base de gelatina en frutos de uchuva; obteniendo un valor mayor en pH de los frutos control, en comparación con los frutos recubiertos.

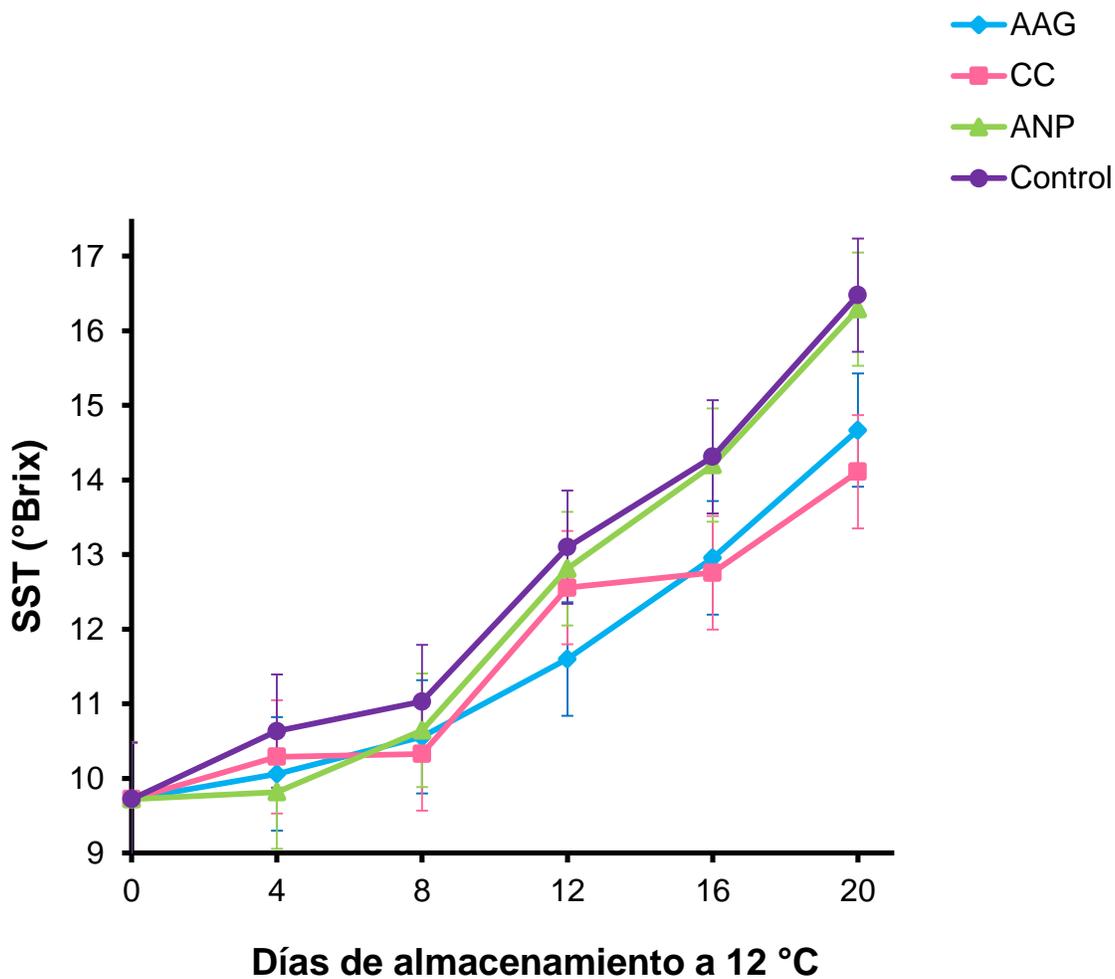
Gol y col (2013) observaron un menor incremento en el pH de frutos de fresa tratados con recubrimientos a base de quitosano, en comparación con los frutos

Control (sin recubrir). Resultados similares fueron encontrados por Navarro y col (2011) para frutos de mango tratados con recubrimientos comestibles a base de almidón de papa y almidón de yuca. Este aumento se da probablemente debido a la reducción de la actividad metabólica, la disminución de esta actividad es provocada por la menor difusión del oxígeno.

Restrepo y Aristizábal (2010) reportan valores menores de pH en frutos de fresa recubiertos con cera de carnauba y gel mucilaginoso de sábila, en comparación con los frutos no recubiertos. Por su parte Miranda y col (2016) observan un valor mayor de pH en papayas recubiertas con cera comercial, en comparación con los frutos Control (sin recubrir). Resultados similares fueron obtenidos por Téllez y col (2011) para frutos de curuba tratados con una cera comercial. Estos autores reportan que el incremento en el pH de los frutos encerados se dio debido a la reducción de la acidez por efecto de la maduración de los mismos.

### **c Sólidos Solubles Totales**

En la **Figura 22** se muestran los resultados obtenidos para Sólidos solubles Totales (SST) expresados en °Brix en frutos de mango cv. Haden almacenados por 20 días a  $12 \pm 1$  °C, teniendo como valor promedio de SST al momento de la cosecha  $9.72 \pm 1.52$  °Brix. Se observa un incremento constante para SST durante el periodo de almacenamiento, con un incremento marcado en el día 8 para los tratamientos Control, ANP y CC; mientras que el tratamiento AAG tuvo una tendencia constante. Para el día 12 se obtuvieron valores de  $13.10 \pm 1.15$ ,  $12.81 \pm 1.13$ ,  $12.56 \pm 1.52$  y  $11.60 \pm 0.66$  °Brix para Control, ANP, CC y AAG, respectivamente. Este comportamiento corresponde a que los carbohidratos se incrementan durante el almacenamiento de



**Figura 22.** Contenido de sólidos solubles totales (°Brix) de frutos de mango cv. Haden almacenados durante 20 días a  $12 \pm 1$  °C. Las barras verticales representan  $LSD = 0.75\%$  ( $\alpha = 0.05$ ).

los frutos, debido a la generación de sacarosa y otros carbohidratos de bajo peso molecular, a partir del almidón de reserva, con la participación de enzimas amilasas (Rosli y col 2004).

Los tratamientos ANP y Control mostraron un comportamiento similar, durante todo el periodo de almacenamiento, sin embargo, no presentaron diferencia estadística significativa ( $p > 0.05$ ) entre ellos. El tratamiento AAG presentó diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) con los tratamientos ANP y Control el día 20. Por su parte el tratamiento CC mostró diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) con el tratamiento Control los días 16 al 20. El día 20 de almacenamiento se presentó diferencia significativa entre el tratamiento Control y los tratamientos AAG y CC, alcanzando valores de  $16.48 \pm 0.64$ ,  $16.29 \pm 0.43$ ,  $14.61 \pm 0.67$  y  $14.11 \pm 1.43$  °Brix para Control, ANP, AAG y CC, respectivamente. El tratamiento que obtuvo el mayor incremento en pH fue el Control, mientras que el tratamiento CC fue el que alcanzó el menor cambio de SST con respecto al valor promedio inicial.

Franco y col (2017) obtuvieron un valor de SST menor para frutos de fresa tratados con un recubrimiento a base de gelatina y almidón acetilado. Resultados similares fueron encontrados por Castro y Blair (2010), quienes registraron valores mayores de SST para los frutos Control, en comparación de los frutos de uchuva recubiertos con una formulación a base de gelatina. Esto se debe posiblemente a que los frutos Control, a diferencia de los recubiertos, pierden mayor cantidad de agua en procesos de transpiración y consecuentemente, se acelera el proceso de maduración y se concentran los azúcares.

Estrada-Mesa y col (2015) reportaron una mayor concentración de SST en frutos de mango con recubrimiento de almidón de yuca, en comparación con el tratamiento Control. Por el contrario, Ali y col (2010) registraron el valor más bajo de SST frutos recubiertos con goma arábica, demostrando que los recubrimientos proporcionaban una excelente película semipermeable alrededor de la fruta, modificando la atmósfera interna al reducir el O<sub>2</sub> y/o elevando el CO<sub>2</sub>, y por lo tanto suprimiendo la producción de etileno. Resultados similares fueron encontrados por Kittur (2001) para frutos de mango y plátano tratados con recubrimientos a base de polisacáridos.

Por su parte, Achipiz y col (2013) reportan una disminución en los valores de SST para frutos de guayaba tratados con recubrimientos de almidón de papa, aloe vera y cera de carnauba en comparación con los frutos sin recubrir, lo cual relacionaron con la menor tasa de respiración exhibida por estos frutos respecto a la muestra testigo, afectando la síntesis y degradación de compuestos de reserva en el ciclo de Krebs, que en el caso de los frutos son los azúcares y los ácidos orgánicos. Resultados similares fueron reportados por Velickova y col (2013) quienes encontraron una disminución en el contenido de SST en fresas recubiertas con una formulación a base de quitosano y cera de abeja al final del almacenamiento, en comparación con los frutos no recubiertos y por Téllez y col (2011) para frutos de curuba tratados con una cera comercial.

## VIII CONCLUSIONES

1. El contenido de gelatina y el contenido de glicerol presentaron efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre las variables de respuesta evaluadas; resistencia a la ruptura, deformación, permeabilidad al vapor de agua y solubilidad.
2. Los modelos de predicción obtenidos en cada una de las variables de respuesta evaluadas en esta investigación, fueron adecuados y reproducibles, ya que presentaron valores de  $R^2$  ajustada  $\geq 0.82$ , coeficientes de variación (CV)  $< 15.89$  % y  $p$  de F  $< 0.0001$ , estos valores no presentaron falta de ajuste.
3. Las condiciones óptimas encontradas para la elaboración de películas comestibles con propiedades mecánicas y de barrera adecuadas fueron: Contenido de gelatina de 17.99 % y Contenido de glicerol de 15 %.
4. Los valores de las variables de respuesta evaluadas en las películas comestibles elaboradas con las condiciones óptimas de contenido de gelatina y contenido de glicerol, no presentaron diferencia estadística significativa ( $p > 0.05$ ) con los valores predichos por los modelos experimentales. Por lo que los modelos probados demostraron tener un buen ajuste para encontrar las mejores condiciones de contenido de gelatina y contenido de glicerol, para la elaboración de películas y recubrimientos comestibles.
5. Los recubrimientos comestibles elaborados a partir de una formulación optimizada de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol retardaron la maduración de frutos de mango cv. Haden, ya que presentaron mejores características de calidad (Pérdida de peso,  $\Delta E$ , firmeza, AT, pH y °Brix) en comparación con los frutos no recubiertos, y los frutos recubiertos con una formulación de almidón nativo de maíz después de 20 días de almacenamiento en refrigeración ( $12 \pm 1$  °C).

6. Los parámetros de calidad (Pérdida de peso,  $\Delta E$ , firmeza, AT, pH y °Brix) de los frutos tratados con recubrimientos comestibles elaborados partir de la formulación optimizada de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol no presentaron diferencia significativa con los obtenidos en frutos recubiertos con cera de carnauba después de 20 días de almacenamiento en refrigeración ( $12 \pm 1$  °C), sin embargo, estos últimos presentaron un menor pH y °Brix.
7. La combinación de almidón de maíz acetilado, gelatina y glicerol en la formulación, permitió obtener películas comestibles eficientes propiedades mecánicas y de barrera, mejores o iguales a las reportadas por la bibliografía. De igual manera, dicha formulación pudo ser utilizada como recubrimiento comestible para mantener las características de calidad y alargar la vida poscosecha de fruto de mango cv. Haden.

## IX BIBLIOGRAFÍA

**Achipiz S, Castillo AE, Mosquera SA, Hoyos JL, Navia DP. 2013.** Efecto de recubrimiento a base de almidón sobre la maduración de la guayaba (*Psidium guajava*). Biotecnología en el Sector Agropecuario y agroindustrial 11:92-100.

**Aguilar-Méndez MA, Martín-Martínez ES, Tomás SA, Cruz-Orea A, Jaime-Fonseca, MR. 2008.** Gelatine–starch films: Physicochemical properties and their application in extending the post-harvest shelf life of avocado (*Persea americana*). Journal of the Science of Food and Agriculture 88(2):185-193.

**Aguilar-Mendez MA, Martín-Martínez S, Espinoza-Herrera NL, Sánchez-Flores M, Cruz-Orea A, Ramírez-Ortíz ME. 2012.** Caracterización y aplicación de películas a base de gelatina-carboximetilcelulosa para la preservación de frutos de guayaba. Superficies y Vacío 25(1):1-7.

**Aguilar-Palazuelos E. 2007.** Obtención y caracterización de materias biodegradables utilizando las tecnologías de extrusión termoplástica y moldeo por inyección [Tesis de Doctorado]. Santiago de Querétaro, Querétaro: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. 211 p. Disponible en: Biblioteca de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos.

**Al-Hassan A, Norziah MH. 2012.** Starch–gelatin edible films: Water vapor permeability and mechanical properties as affected by plasticizers. Food Hydrocolloids 26(1):108-117.

**Ali A, Maqbool M, Ramachandran S, Alderson PG. 2010.** Gum arabic as a novel edible coating for enhancing shelf-life and improving postharvest quality of

tomato (*Solanum lycopersicum L.*) fruit. *Postharvest Biology and Technology* 58(1):42-47.

**Altan A, McCarthy KL, Maskan M. 2008.** Extrusion cooking of barley flour and process parameter optimization by using response surface methodology. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 88(9):1648-1659.

**Amaya P, Peña L, Mosquera A, Villada H, Villada D. 2010.** Efecto del uso de recubrimientos sobre la calidad de tomate. *Dyna* 77(162):67-73.

**Anchundia K, Santacruz S, Coloma J. 2016.** Caracterización física de películas comestibles a base de cáscara de plátano (*Musa Paradisiaca*). *Revista chilena de nutrición* 43(4):394-399.

**Andrade-Pizarro RD, Skurtys O, Osorio-Lira F. 2015.** Effect of cellulose nanofibers concentration on mechanical, optical, and barrier properties of gelatin-based edible films. *Dyna* 82(191):219-226.

**AOAC. 2012.** Official Methods of analysis. 19 ed. Washington, D.C. Association of Official Analytical Chemists.

**Arvanitoyannis IS. 2002.** Formation and properties of collagen and gelatin films and coatings. En: Gennadios A, editor. *Protein-based films and coatings*. Florida: CRC Press. p 275-304.

**Baldwin EA, Burns JK, Kazokas W, Brecht JK, Hagenmaier RD, Bender RJ, Pesis E. 1999.** Effect of two edible coatings with different permeability characteristics on mango (*Mangifera indica L.*) ripening during storage. *Postharvest Biology and Technology* 17(3):215-226.

- Baldwin EA. 1999.** Surface treatments and edible coatings in food preservation. En: Rahman MS, editor. Handbook of food preservation. New York, NY: Marcel Dekker. p 615-648.
- Baziwane D, He Q. 2003.** Gelatin: the paramount food additive. Food Reviews International 19(4):423-435.
- Bergo P, Sobral PJ. 2007.** Effects of plasticizer on physical properties of pigskin gelatin films. Food Hydrocolloids 21(8):1285-1289.
- Bertuzzi MA, Castro-Vidaurre EF, Armada M, Gottifredi JC. 2007.** Water vapor permeability of edible starch based films. Journal of Food Engineering 80:972-978.
- Bigi A, Panzavolta S, Rubini K. 2004.** Relationship between triple-helix content and mechanical properties of gelatin films. Biomaterials 25(25):5675-5680.
- Bohórquez NV, Enciso NA, Hernández WA. 2016.** Efecto del almacenamiento sobre las propiedades físicas de las películas de quitosano con inclusión de aceites esenciales de tomillo y romero. Matéria 21(1):141-156.
- Bourtoom T, Chinnan MS. 2008.** Preparation and properties of rice starch–chitosan blend biodegradable film. LWT-Food Science and Technology 41(9):1633-1641.
- Bourtoom T. 2008.** Edible films and coatings: characteristics and properties. International Food Research Journal 15(3):237-248.
- Bourtoom T. 2009.** Edible protein films: properties enhancement. International Food Research Journal 16(1):1-9.

- Brownleader MD, Jackson P, Mobasheri A, Pantelides AT, Sumar S, Trevan M, Dey PM. 1999.** Molecular aspects of cell wall modifications during fruit ripening. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 39:149-164.
- Buléon A, Colonna P, Planchot V, Ball S. 1998.** Starch granules: structure and biosynthesis. *International journal of biological macromolecules* 23(2):85-112.
- Calderón-Castro A, Vega-García MO, Zazueta-Morales JJ, Fitch-Vargas PR, Carrillo-López A, Gutiérrez-Dorado R, Limón-Valenzuela V, Aguilar-Palazuelos E. 2018.** Effect of extrusion process on the functional properties of high amylose corn starch edible films and its application in mango (*Mangifera indica L.*) cv. Tommy Atkins. *Journal of Food Science and Technology* 9:1-10.
- Camire ME, Camire A, Krumhar K. 1990.** Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition* 29(1):35-57.
- Campos CA, Gerschenson LN, Flores SK. 2011a.** Development of edible films and coatings with antimicrobial activity. *Food Bioprocess Technology* 4:849-875.
- Campos RP, Kwiatkowski A, Clemente, E. 2011b.** Post-harvest conservation of organic strawberries coated with cassava starch and chitosan. *Revista Ceres* 58(5):554-560.
- Cao N, Fu Y, He J. 2007a.** Mechanical properties of gelatin films cross-linked, respectively, by ferulic acid and tannin acid. *Food Hydrocolloids* 21(4):575-584.
- Cao N, Fu Y, He J. 2007b.** Preparation and physical properties of soy protein isolate and gelatin composite films. *Food Hydrocolloids* 21(7):1153-1162.

- Carrera A, Mark D, Gil R. 2008.** Algunas características físicas y químicas de frutos de cinco variedades de mango en condiciones de sabana del estado Monagas. *Agronomía Tropical* 58(1):27-30.
- Castro RA, Blair GHG. 2010.** Evaluación fisicoquímica de la efectividad de un recubrimiento comestible en la conservación de uchuva (*Physalis peruviana L.* var. Colombia). *Alimentos Hoy* 19(21):16-34.
- Chiumarelli M, Ferrari CC, Sarantópoulos CI, Hubinger MD. 2011.** Fresh cut 'Tommy Atkins' mango pre-treated with citric acid and coated with cassava (*Manihot esculenta Crantz*) starch or sodium alginate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 12(3):381-387.
- Chiumarelli M, Hubinger MD. 2012.** Stability, solubility, mechanical and barrier properties of cassava starch-Carnauba wax edible coatings to preserve fresh-cut apples. *Food Hydrocolloids* 28(1):59-67.
- Chiumarelli M, Hubinger MD. 2014.** Evaluation of edible films and coatings formulated with cassava starch, glycerol, carnauba wax and stearic acid. *Food Hydrocolloids* 38:20-27.
- Choi WS, Han JH. 2002.** Film-forming mechanism and heat denaturation effects on the physical and chemical properties of pea-protein-isolate edible films. *Journal of Food Science* 67(4):1399-1406.
- Contreras-Madellin R, Labuza TP. 1981.** Prediction of moisture protection requirements for foods. *Cereal Food World* 26:335-343.

- Cuq B, Gontard N, Guilbert S. 1998.** Proteins as agricultural polymers for packaging production. *Cereal Chemistry* 75:1-9.
- Dai CA, Chen YF, Liu MW. 2006.** Thermal properties measurements of renatured gelatin using conventional and temperature modulated differential scanning calorimetry. *Journal of Applied Polymer Science* 99(4):1795-1801.
- De Graaf RA, Broekroelofs A, Janssen L. 1998.** The Acetylation of Starch by Reactive Extrusion. *Starch-Stärke* 50(5):198-205.
- Debeaufort F, Martin-Polo M, Voilley A. 1993.** Polarity homogeneity and structure affect water vapor permeability of model edible films. *Journal of Food Science* 58(2):426-429.
- Debeaufort F, Quezada-Gallo JA, Voilley A. 1998.** Edible films and coatings: Tomorrow's packagings: A review. *Critical Reviews in Food Science* 38:299-313.
- Dhall RK. 2013.** Advances in edible coatings for fresh fruits and vegetables: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 53(5):435-450.
- Diab T, Biliaderis GC, Gerasopoulos D, Sfakiotakis E. 2001.** Physicochemical properties and application of pullulan edible films and coatings in fruit preservation. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 81:988-1000.
- Dick M, Costa TM, Gomaa A, Subirade M, de Oliveira Rios A, Flôres SH. 2015.** Edible film production from chia seed mucilage: Effect of glycerol concentration

on its physicochemical and mechanical properties. *Carbohydrate Polymers* 130:198-205.

**Djagny KB, Wang Z, Xu S. 2001.** Gelatin: a valuable protein for food and pharmaceutical industries. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 41(6):481-492.

**Dobrynin AV, Colby RH, Rubinstein M. 2004.** Polyampholytes. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* 42(19):3513-3538.

**Domínguez-Courtney M, Jiménez–Munguía M. 2012.** Películas comestibles formuladas con polisacáridos: propiedades y aplicaciones. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* 6:110-121.

**Domínguez-Martínez BM. 2017.** Desarrollo y caracterización de películas biodegradables a base de quitosano, alcohol polivinílico y mucílago de nopal para conservación de fresa [Tesis de doctorado]. Querétaro, Querétaro. Instituto Politécnico Nacional. 97p.

**Dziezak JD. 1989.** Single-screw and twin-screw extruders in food-processing. *Food Technology* 43(4):164-174.

**Estrada-Mesa EM, Padilla-Reyes F, Márquez-Cardozo CJ. 2015.** Efecto de recubrimientos protectores sobre la calidad del mango (*Mangifera indica* L.) en poscosecha. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica* 18(1):181-188.

**Fakhouri FM, Martelli SM, Caon T, Velasco JI, Buontempo RC, Bilck AP, Mei LH. 2017.** The effect of fatty acids on the physicochemical properties of edible films

composed of gelatin and gluten proteins. *LWT-Food Science and Technology* 87:293-300.

**Fakhouri FM, Martelli SM, Caon T, Velasco JI, Mei LH. 2015.** Edible films and coatings based on starch/gelatin: Film properties and effect of coatings on quality of refrigerated Red Crimson grapes. *Postharvest Biology and Technology* 109:57-64.

**Fakhoury FM, Martelli SM, Bertan LC, Yamashita F, Mei LH, Queiroz, FP. 2012.** Edible films made from blends of manioc starch and gelatin–Influence of different types of plasticizer and different levels of macromolecules on their properties. *LWT-Food Science and Technology* 49(1):149-154.

**Famá L, Gerschenson LN, Goyanes S. 2009.** Nanocompuestos biodegradables y comestibles: almidón-polvo de ajo. *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales S 1:1235-1240.*

**Félix-Salazar LA. 2017.** Efecto de la modificación química por acetilación de fibra de bagazo de caña y almidón de maíz utilizando extrusión reactiva para su posible aplicación en materiales biodegradables con mayor estabilidad al agua extrusión [Tesis de maestría]. Culiacán, Sinaloa: Universidad Autónoma de Sinaloa. 143 p. Disponible en: Biblioteca de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos.

**Figuroa JA, Salcedo JG, Narváez GJ. 2013.** Efecto de recubrimientos comestibles a base de almidón nativo y oxidado de yuca sobre la calidad de mango (*Tommy Atkins*). *Interciencia* 28(10):593-596.

- Fitch-Vargas PR, Aguilar-Palazuelos E, Zazueta-Morales JJ, Vega-García MO, Valdez-Morales JE, Martínez-Bustos F, Jacobo-Valenzuela N. 2016.** Physicochemical and microstructural characterization of corn starch edible films obtained by a combination of extrusion technology and casting technique. *Journal of Food Science* 8(9):2224-2232.
- Franco MJ, Martin AA, Bonfim LF, Caetano J, Linde GA, Dragunski DC. 2017.** Effect of plasticizer and modified starch on biodegradable films for strawberry protection. *Journal of Food Processing and Preservation* 41(4).
- Fredriksson H, Silverio J, Andersson R, Eliasson AC, Åman P. 1998.** The influence of amylose and amylopectin characteristics on gelatinization and retrogradation properties of different starches. *Carbohydrate Polymers* 35(3-4):119-134.
- French D. 1984.** Organization of starch granules. En: Whistler RL, BeMiller JN, Paschall EF, editores. *Starch: Chemistry and Technology* 2<sup>da</sup> ed. San Diego, California: Academic Press. p 183-247.
- Fringant C, Rinaudo M, Gontard N, Guilbert S, Derradji H. 1998.** A biodegradable starch based coating to waterproof hydrophilic materials. *Starch-Stärke* 50(7):292-296.
- Funke U, Bergthaller W, Lindhauer MG. 1998.** Processing and characterization of biodegradable products based on starch. *Polymer Degradation and Stability* 59(1-3):293-296.

- Garcia MA, Martino MN, Zaritzky NE. 1998.** Starch-based coatings: effect on refrigerated strawberry (*Fragaria ananassa*) quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 76(3):411-420.
- Garcia MA, Martino MN, Zaritzky NE. 2000.** Lipid addition to improve barrier properties of edible starch-based films and coatings. *Journal of Food Science* 65(6):941-944.
- García MA, Pinotti A, Martino MN, Zaritzky NE. 2009.** Characterization of starch and composite edible films and coatings. En: Embuscado ME, Huber KC, editores. *Edible films and coatings for food applications*. Nueva York: Springer. p 169-210.
- Gennadios A, Weller C, Testin RF. 1993.** Temperature effect on oxygen permeability of edible protein-based films. *Journal of Food Science* 58(1):212-214.
- Gennadios A, Weller CL. 1991.** Edible films and coatings from soymilk and soy protein. *Cereal foods world* 36(12):1004-1009.
- Gol NB, Patel PR, Rao TR. 2013.** Improvement of quality and shelf-life of strawberries with edible coatings enriched with chitosan. *Postharvest Biology and Technology* 85:185-195.
- Gómez-Estaca J, Gómez-Guillén MC, Fernández-Martín F, Montero P. 2011.** Effects of gelatin origin, bovine-hide and tuna-skin, on the properties of compound gelatin-chitosan films. *Food Hydrocolloids* 25:1461–1469.

- Gómez-Guillén MC, Giménez B, López-Caballero ME, Montero MP. 2011.** Functional and bioactive properties of collagen and gelatin from alternative sources: A review. *Food Hydrocolloids* 25(8):1813-1827.
- Gómez-Guillén MC, Pérez-Mateos M, Gómez-Estaca J, López-Caballero E, Giménez B, Montero P. 2009.** Fish gelatin: a renewable material for developing active biodegradable films. *Trends in Food Science & Technology* 20(1):3-16.
- Gontard N, Guilbert S, Cuq JL. 1993.** Water and Glycerol as Plasticizer Affect Mechanical and Water Vapor Barrier Properties of an Edible Wheat Gluten Film. *Journal of Food Science* 58:206-211.
- González RJ, Torres RL, De Greef DM. 2002.** Extrusión-cocción de cereales. *Boletín da Sociedade Brasileira de Ciencia e Tecnologia de Alimentos* 36(2):83-136.
- Greener DI, Fennema O. 1994.** Edible Films and Coatings: Characteristics, Formation, Definitions and Testing Methods. En: Krochta JM, Baldwin EA, Nisperos-Carriedo M, editores. *Edible Coatings and Films to Improve Food Quality*. Lancaster, Pensilvania: Technomic. p 1-21.
- Guerra-Della valle, D. 2007.** Efecto del nivel de acetilación en las características morfológicas y moleculares del almidón de plátano (*Musa paradisiaca L.*) [Tesis de doctorado]. Morelos, México: Instituto Politécnico Nacional. 78 p.
- Guilbert S, Biquet B. 1995.** Películas y envolturas comestibles, Embalaje de los alimentos de gran consumo. *Acribia Zaragoza* 57:190-199.
- Guilbert S, Gontard N, Cuq B, 1995.** Technology and applications of edible protective films. *Packaging Technology and Science* 8:339-346.

- Hartel RW, Heldman DR. 2012.** Principles of food processing. New York, NY: Springer Science & Business Media. 288 p.
- Henríquez C, González R, Krarup C. 2005.** Tratamientos térmicos y progresión del daño por enfriamiento y de la pigmentación de tomates en poscosecha. Ciencia e Investigación Agraria 32(2):113-123.
- Hernández-Izquierdo VM, Krochta JM. 2008.** Thermoplastic processing of proteins for film formation: A review. Journal of Food Science 73(2):30-39.
- Hernández-Muñoz P, Almenar E, Valle VD, Velez D, Gavara R. 2008.** Effect of chitosan coating combined with postharvest calcium treatment on strawberry (*Fragaria x ananassa*) quality during refrigerated storage. Food Chemistry 110(2):428-435.
- Herrera MP, Vasanthan T, Chen L. 2017.** Rheology of starch nanoparticles as influenced by particle size, concentration and temperature. Food Hydrocolloids 66:237-245.
- Hoa TT, Ducamp MN, Lebrun M, Baldwin EA. 2001.** Effect of different coating treatments on the quality of mango fruit. Journal of Food Quality 25(6):471-486.
- Hosseini SF, Rezaei M, Zandi M, Ghavi FF. 2013.** Preparation and functional properties of fish gelatin-chitosan blend edible films. Food Chemistry 136(3):1490-1495.
- Jímenez A, Fabra MJ, Talens P, Chiralt A. 2012.** Edible and biodegradable starch films: a review. Food Bioprocess and Technology 5:2058-2076.

**Johnston-Banks FA. 1990.** Gelatine. En Harris P, editor. Food gels. New York, NY: Elsevier. p 233-289.

**Jongjareonrak A, Benjakul S, Visessanguan W, Prodpran T, Tanaka M. 2006.** Characterization of edible films from skin gelatin of brownstripe red snapper and bigeye snapper. Food Hydrocolloids 20(4):492-501.

**Jooyandeh H. 2011.** Whey protein films and coatings: A review. Pakistan Journal of Nutrition 10(3):296-301.

**Kader AA. 1986.** Biochemical and Physiological basis for effects of controlled and modified atmospheres on fruits and vegetables. Food Technology 40:99-104.

**Kaplan HJ. 1986.** Washing, Waxing and Color Adding. En: Wardowski WF, Nagy S, Grierson W, editores. Fresh Citrus Fruits. New York, NY: AVI Publishing Co. p 379.

**Karim AA, Bhat R. 2008.** Gelatin alternatives for the food industry: recent developments, challenges and prospects. Trends in Food Science and Technology 19(12):644-656.

**Kays SJ. 1997.** Postharvest Physiology of Perishable Plant Products. Athens, Georgia: Exon Press. p 532.

**Kester JJ, Fennema OR. 1986.** Edible films and coating: A review. Food Technology 40:47-59.

- Khan T, Park JK, Kwon JH. 2007.** Functional biopolymers produced by biochemical technology considering applications in food engineering. *Korean Journal of chemical Engineering*. 24(5):816- 826.
- Kittur FS, Saroja N, Tharanathan R. 2001.** Polysaccharide-based composite coating formulations for shelf-life extension of fresh banana and mango. *European Food Research and Technology* 213(4):306-311.
- Krochta JM, De Mulder-Johnston C. 1997.** Edible and biodegradable polymer films: Challenges and opportunities. *Food Technology* 51(2):61-74.
- Krochta JM. 1997.** Edible protein films and coatings. En. Damodaran S, Paraf A, editores. *Food proteins and their applications*. 1<sup>a</sup> ed. New York, NY. p. 529-550.
- Lacroix M, Ouattara B. 2000.** Combined industrial processes with irradiation to assure innocuity and preservation of food products: A review. *Food Research International* 33(2):719-724.
- Lafargue D, Lourdin D, Doublier JL. 2007.** Film-forming properties of a modified starch/k-carrageenan mixture in relation to its rheological behaviour. *Carbohydrate Polymers* 70(1):101-111.
- Landerito NA, Wang YJ. 2005.** Preparation and properties of starch phosphates using waxy, common, and high-amylose corn starches. II. Reactive extrusion method. *Cereal Chemistry* 82(3):271-276.
- Larotonda FD, Matsui KN, Sold V, Laurindo JB. 2004.** Biodegradable films made from raw and acetylated cassava starch. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 47(3):477-484.

- Ledward DA. 1986.** Gelation of gelatin. En Mitchell JR, Ledward DA, editors. Functional-Properties of Food Macromolecules 171-201. Londres, Inglaterra: Elsevier Applied Science. p 171-201.
- Lin D, Zhao Y. 2007.** Innovations in the development and application of edible coatings for fresh and minimally processed fruits and vegetables. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 6(3):60-75.
- López OV. 2011.** Desarrollo, caracterización y aplicación de envases biodegradables a partir de almidón [Tesis de Doctorado]. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de la Plata. 263 p.
- López-de Lacey AL. 2012.** Diseño, desarrollo y aplicación de envases comestibles potencialmente bioactivos [Tesis de doctorado]. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid. 379 p.
- Maftoonazad N, Ramaswamy HS, Moalemiyan M, Kushalappa AC. 2007.** Effect of pectin-based edible emulsion coating on changes in quality of avocado exposed to *Lasiodiplodia theobromae* infection. Carbohydrate Polymers 68(2):341-349.
- Maftoonazad N, Ramaswamy HS. 2005.** Postharvest shelf-life extensión of avocados using methyl cellulose-based coating. LWT-Food Science and Technology 38:617-624.
- Mali S, Grossmann MVE. 2001.** Preparation of acetylated distarch adipates by extrusion. LWT-Food Science and Technology 34(6):384-389.

- Mali S, Sakanaka LS, Yamashita F, Grossmann MVE. 2005.** Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect. *Carbohydrate Polymers* 60(3):283-289.
- Márquez-Hernández YM. 2010.** Formulación y caracterización de recubrimientos comestibles a base de proteína de suero de leche y almidones modificados [Tesis de Licenciatura]. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro. 80 p.
- Martínez-Ortiz, L. 2007.** Obtención y caracterización de almidones de malanga, arroz y maíz ceroso modificados por extrusión termoplástica para su uso como encapsulantes de aceite esencial de naranja [Tesis de maestría]. Veracruz, México: Universidad Veracruzana. 54 p.
- Martucci JF, Ruseckaite RA. 2010.** Biodegradable three-layer film derived from bovine gelatin. *Journal of Food Engineering* 99(3):377-383.
- Marzo-Rojas I. 2010.** Efecto del tipo y contenido de aceites esenciales sobre las propiedades mecánicas y barrera de películas comestibles basadas en zeína [Tesis de Licenciatura]. Pamplona: Universidad Pública de Navarra. 171 p.
- Matta MD, Sarmiento SS, Sarantópoulos CG, Zocchi SS. 2011.** Barrier properties of films of pea starch associated with xanthan gum and glycerol. *Polímeros* 21:67-72.
- McGuire RG. 1992.** Reporting of objective color measurements. *HortScience* 27:1254-1255.

- McHugh TH, Avena-Bustillos R, Krochta JM. 1993.** Hydrophilic edible films: modified procedure for water vapor permeability and explanation of thickness effects. *Journal of Food Science* 58(4):899-903.
- McHugh TH, Krochta JM. 1994a.** Sorbitol vs glycerol-plasticized whey protein edible films: integrated oxygen permeability and tensile property evaluation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 42(4):841-845.
- McHugh TH, Krochta, JM. 1994b.** Milk protein-based edible films and coatings. *Food Technology* 48:97-103.
- McHugh TH, Senesi E. 2000.** Apple wraps: a novel method to improve the quality and extend the shelf life of fresh-cut apples. *Journal of Food Science* 65:480-485.
- McHugh TH, Weller CL, Krochta JM. 1994.** Edible coatings and films based on proteins. En: Krochta JM, Baldwin EA, Nisperos-Carriedo MO, editors. *Edible coatings and films to improve food quality*. Lancaster, California: Technomic Publishing. p. 201–277.
- McHugh TH. 2000.** Protein-lipid interactions in edible films and coatings. *Nahrung* 44:148-151.
- Miladinov VD, Hanna MA. 2000.** Starch esterification by reactive extrusion. *Industrial Crops and Products* 11(1):51-57.
- Miranda AD, Alvis A, Arrazola G. 2016.** Efectos de dos recubrimientos sobre la calidad de la papaya (*carica papaya*) variedad tainung. *Temas Agrarios* 19(1):7-18.

- Montalvo C, López-Malo A, Palou E. 2012.** Películas comestibles de proteína: características, propiedades y aplicaciones. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* 6(2):32-46.
- Moorthy SN. 1985.** Acetylation of cassava starch using perchloric acid catalysis. *Starch-Stärke* 37(9):307-308.
- Motedayen AA, Khodaiyan F, Salehi EA. 2013.** Development and characterisation of composite films made of kefir and starch. *Food Chemistry* 136(3):1231-1238.
- Murúa-Pagola B, Beristain-Guevara CI, Martínez-Bustos F. 2009.** Preparation of starch derivatives using reactive extrusion and evaluation of modified starches as shell materials for encapsulation of flavoring agents by spray drying. *Journal of Food Engineering* 91(3):380-386.
- Myers AM, Morell MK, James MG, Ball SG. 2000.** Recent progress toward understanding biosynthesis of the amylopectin crystal. *Plant Physiology* 122(4):989-998.
- Nadim Z, Ahmadi E, Sarikhani H, Amiri Chayjan R. 2014.** Effect of Methylcellulose-Based Edible Coating on Strawberry Fruit's Quality Maintenance During Storage. *Journal of Food Processing and Preservation* 39(1):80-90.
- Navarro YT, Pérez J, Durán D. 2011.** Empleo de recubrimientos comestibles con base en almidón de papa y yuca en la conservación del mango cv. *Zapote*. @limentech, *Ciencia y Tecnología Alimentaria* 10(1).

- Navarro-Tarazaga ML. 2007.** Efecto de la composición de recubrimientos comestibles a base de hidroxipropilmetilcelulosa y cera de abeja en la calidad de ciruelas, naranjas y mandarinas [Tesis de doctorado]. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia. 223 p.
- Nieto MB. 2009.** Structure and function of polysaccharide gum-based edible films and coatings. En Embuscado ME, Huber KC, editors. Edible films and coatings for food applications. New York, NY: Springer. p 57–112.
- Normand V, Muller S, Ravey JC, Parker A. 2000.** Gelation kinetics of gelatin: a master curve and network modeling. *Macromolecules* 33(3):1063-1071.
- Nussinovitch A, Lurie S. 1995.** Edible coatings for fruits and vegetables. *Postharvest News and Information* 6:53-57.
- Olivares ML. 2007.** Caracterización reológica y reométrica de soluciones macromoleculares eléctricamente cargadas: aplicación a gelatinas comerciales [Tesis de doctorado]. Santa Fe, Argentina: Universidad Nacional del Litoral. 75p.
- Olivas GI, Barbosa-Cánovas G. 2009.** Edible Films and Coatings for Fruits and Vegetables. En: Embuscado ME, Huber KC, editores. *Edible Films and Coatings for Food Applications*. New York: Springer. p 211-239.
- Oikku J, Linko P. 1977.** Effects of thermal processing on cereal based food systems. En: Downey WK, editor. *Food Quality and Nutrition, Research Priorities for Thermal Processing*. Dublin, Ireland: Elsevier. p 575-579.
- Park HJ. 1999.** Development of advanced edible coatings for fruits. *Trends in Food Science & Technology* 10:254-260.

- Park SK, Rhee CO, Bae DH, Hettiarachchy NS. 2001.** Mechanical properties and water-vapor permeability of soy-protein films affected by calcium salts and glucono- $\delta$ -lactone. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49(5):2308-2312.
- Parra DF, Tadini CC, Ponce P, Lugão AB. 2004.** Mechanical properties and water vapor transmission in some blends of cassava starch edible films. *Carbohydrate Polymers* 58:475-481.
- Pavlath A, Orts W. 2009.** Edible Films and Coatings: Why, What, and How?. *Edible Films and Coatings for Food Applications*. New York: Springer. p 1-25.
- Peña C, De La Caba KO, Eceiza A, Ruseckaite R, Mondragon I. 2010.** Enhancing water repellence and mechanical properties of gelatin films by tannin addition. *Bioresource Technology* 101(17):6836-6842.
- Peñaranda-Contreras OI, Perilla-Perilla JE, Algecira-Enciso NA. 2008.** Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos. *Ingeniería e Investigación* 28(3):47-52.
- Pérez B, Báez R. 2003.** Utilización de ceras comestibles en la conservación de frutas. *Alimentaria* 40(345):59-65.
- Pérez B, Bringas E, Mercado JN, Saucedo C, Cruz L, Báez R. 2004.** Aplicación de cera comestible en mango. Parte II: estudios fisiológicos asociados a la maduración del fruto durante el almacenamiento comercial. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha* 6(1).

**Pérez-Gago MB, Nadaud P, Krochta JM. 1999.** Water vapor permeability, solubility, and tensile properties of heat-denatured versus native whey protein films. *Journal of Food Science* 64(6):1034-1037.

**Pierson JT, Monteith GR, Roberts-Thomson SJ, Dietzgen RG, Gidley MJ, Shaw PN. 2014.** Phytochemical extraction, characterisation and comparative distribution across four mango (*Mangifera indica* L.) fruit varieties. *Food Chemistry* 149:253-263.

**Prieto-Méndez J, Trejo-Cárdenas CL, Prieto-García F, Méndez-Marzo MA, Bello-Pérez LA, Román-Gutiérrez AD. 2010.** Acetilación y caracterización del almidón de cebada. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 6(1):32-43.

**Quintero C, Falguera V, Muñoz H. 2010.** Films and edible coatings: importance, and recent trends in fruit and vegetable value chain. *Revista Tumbaga* 5:93-118.

**Regalado C, Pérez-Pérez C, Lara-Cortes E, García-Almendárez B. 2006.** Whey protein based edible food packaging films and coatings. *Agricultural and Food Biotechnology* 237-261.

**Resa CP, Jagus RJ, Gerschenson LN. 2014.** Effect of natamycin, nisin and glycerol on the physicochemical properties, roughness and hydrophobicity of tapioca starch edible films. *Materials Science and Engineering* 40:281-287.

**Restrepo JI, Aristizábal ID. 2010.** Conservación de fresa (*fragaria x ananassa duch cv. Camarosa*) mediante la aplicación de recubrimientos comestibles de gel

mucilaginoso de penca sábila (*aloe barbadensis miller*) y cera de carnauba. *Vitae* 17(3):252-263.

**Rodríguez M, Osés J, Ziani K, Mate JI. 2006.** Combined effect of plasticizers and surfactants on the physical properties of starch based edible films. *Food Research International* 39: 840-846.

**Rojas-Graü MA, Soliva-Fortuny R. Martín-Belloso O. 2009.** Edible coatings to incorporate active ingredients to fresh-cut fruits: a review. *Trends in Food Science & Technology* 20(10):438-447.

**Rosli HG, Civello PM, Martínez GA. 2004.** Changes in cell wall composition of three *Fragaria x ananassa* cultivars with different softening rate during ripening. *Plant Physiology and Biochemistry* 42(10):823-831.

**Ross-Murphy SB. 1992.** Structure and rheology of gelatin gels: recent progress. *Polymer* 33(12):2622-2627.

**Ross-Murphy SB. 1998.** Reversible and irreversible biopolymer gels-structure and mechanical properties. *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie* 102(11):1534-1539.

**Saberi B, Chockchaisawasdee S, Golding JB, Scarlett CJ, Stathopoulos CE. 2017.** Physical and mechanical properties of a new edible film made of pea starch and guar gum as affected by glycols, sugars and polyols. *International Journal of Biological Macromolecules* 104:345-359.

- Sandoval-Aldana A, Rodriguez-Sandoval E, Fernandez-Quintero A. 2005.** Aplicación del análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) para la caracterización de las modificaciones del almidón. *Dyna* 72 (146):45-53.
- Schellman JA. 1987.** The thermodynamic stability of proteins. *Annual review of biophysics and biophysical chemistry* 16(1):115-137.
- Shah U, Naqash F, Gani A, Masoodi FA. 2016.** Art and science behind modified starch edible films and coatings: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 15(3):568-580.
- Shogren RL, Fanta GF, Doane WM. 1993.** Development of Starch Based Plastics-A Reexamination of Selected Polymer Systems in Historical Perspective. *Starch-Stärke* 45(8):276-280.
- Shogren RL. 1996.** Preparation, thermal properties, and extrusion of high-amylose starch acetates. *Carbohydrate Polymers* 29(1):57-62.
- Siller-Cepeda J, Muy-Rangel D, Baez-Sanudo M, Araiza-Lizarde E, Ireta-Ojeda A. 2009.** Postharvest quality of mango cultivars of early, middle and late seasons. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32(1):45-52.
- Singh J, Kaur L, McCarthy OJ. 2007.** Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications: A review. *Food hydrocolloids* 21(1):1-22.
- Slattery CJ, Kavakli IH, Okita TW. 2000.** Engineering starch for increased quantity and quality. *Trends in Plant Science* 5(7):291-298.

- Sobral PD, Menegalli FC, Hubinger MD, Roques MA. 2001.** Mechanical, water vapor barrier and thermal properties of gelatin based edible films. *Food hydrocolloids* 15(4):423-432.
- Soliva R, Martín O. 2001.** Envasado de alimentos mediante recubrimientos comestibles. *Alimentaria* 38(325):29-37.
- Sothornvit R, Rodsamran P. 2008.** Effect of a mango film on quality of whole and minimally processed mangoes. *Postharvest Biology and Technology* 47(3):407-415.
- Stainsby G. 1987.** Gelatin gels. En: Pearson AM, Dutson TR, Bailey AJ, Editores. *Advances in meat research. Vol. 4: Collagen as a Food.* New York, NY: Van Nostrand Reinhold. p 209–222.
- Stanley DW. 1986.** Chemical and structure of determinants of texture of fabricated foods. *Food Technology* 40(3):65-76.
- Su JF, Huang Z, Yuan XY, Wang XY, Li M. 2010.** Structure and properties of carboxymethyl cellulose/soy protein isolate blend edible films crosslinked by Maillard reactions. *Carbohydrate Polymers* 79(1):145-153.
- Tapia-Blácido D, Sobral PJ, Menegalli FC. 2005.** Development and characterization of biofilms based on Amaranth flour (*Amaranthus caudatus*). *Journal of Food Engineering* 67(1):215-223.
- Téllez CP, Fischer G, Quintero OC. 2011.** Comportamiento fisiológico y fisicoquímico de frutos de curuba (*Passiflora mollissima Bailey*) encerados y almacenados a dos temperaturas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 1(1):67-80.

- Tester RF, Debon SJ. 2000.** Annealing of starch: a review. *International Journal of Biological Macromolecules* 27(1):1-12.
- Tester RF, Karkalas J, Qi X. 2004.** Starch structure and digestibility enzyme-substrate relationship. *World's Poultry Science Journal* 60(2):186-195.
- Tharanathan RN. 2003.** Biodegradable films and composite coatings: past, present and future. *Trends in Food Science and Technology* 14:71-78.
- Tian H, Xu G, Yang B, Guo G. 2011.** Microstructure and mechanical properties of soy protein/agar blend films: Effect of composition and processing methods. *Journal of Food Engineering* 107(1):21-26.
- Trejo-Márquez A, Ramos-López KA, Pérez-Guillén C. 2007.** Efecto de la aplicación de un recubrimiento comestible a base de gelatina sobre la calidad de fresa (*Fragaria Vesca L.*) almacenada en refrigeración. In V Congreso Iberoamericano de Tecnología Postcosecha y Agroexportaciones. Cartagena, España: Grupo Postrecolección y Refrigeración UPCT. p. 978-984.
- Valenzuela-Navarro SA. 2016.** Elaboración y caracterización de películas comestibles a partir de una formulación de almidón de maíz y gelatina obtenida por el proceso de extrusión-casting [Tesis de licenciatura]. Culiacán, Sinaloa: Universidad Autónoma de Sinaloa. 107 p.
- Vargas M, Pastor C, Chiralt A, McClements DJ, Gonzalez-Martinez C. 2008.** Recent advances in edible coatings for fresh and minimally processed fruits. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 48(6):496-511.

- Vázquez-Briones MC, Guerrero-Beltrán JA, Juárez-Roldán AR, Jiménez-Munguía M, Aguilar-Raymundo VG, Vélez-Ruiz JF, Vigil AL. 2013.** Recubrimientos de frutas con biopelículas. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* 7(2):5-14.
- Velasco-Ulloa B, Mercado-Ruíz JN, García-Robles JM, Báez-Sañudo R. 2012.** Respuesta física y fisiológica a la aplicación de cera comestible en mangos (*Mangifera indica*) cvs. Tommy atkins y Keitt. *Revista Iberoamericana de Tecnología Poscosecha* 13(2):130-139.
- Velickova E, Winkelhausen E, Kuzmanova S, Alves VD, Moldão-Martins M. 2013.** Impact of chitosan-beeswax edible coatings on the quality of fresh strawberries (*Fragaria ananassa* cv. *Camarosa*) under commercial storage conditions. *LWT-Food Science and Technology* 52(2):80-92.
- Versino F, Lopez OV, Garcia MA, Zaritzky NE. 2016.** Starch-based films and food coatings: An overview. *Starch-Stärke* 68(11-12):1026-1037.
- Wainwright FW. 1977.** Physical tests for gelatin and gelatin products. *The science and technology of gelatin* 507-531.
- Watano S, Shimoda E, Osako Y. 2002.** Measurement of physical strength of pharmaceutical extruded pellets. *Chemical and pharmaceutical bulletin* 50(1):26-30.
- Wills R, Golding J. 2016.** Postharvest: An introduction to the physiology and handling of fruit and vegetables. 6<sup>a</sup> ed. Sidney, Australia: UNSW press. 320 p.

- Xie F, Yu L, Liu H, Chen L. 2006.** Starch modification using reactive extrusion. *Starch-Stärke* 58(3-4):131-139.
- Xu Y, Miladinov V, Hanna MA. 2004.** Synthesis and Characterization of Starch Acetates with High Substitution. *Cereal Chemistry* 81(6):735-740.
- Yaman Ö, Bayoindirli L. 2002.** Effects of an edible coating and cold storage on shelf-life and quality of cherries. *LWT-Food science and Technology* 35(2):146-150.
- Zamudio-Flores PB, Bello-Pérez LA, Vargas-Torres A, Hernández-Uribe JP, Romero-Bastida CA. 2007.** Caracterización parcial de películas preparadas con almidón oxidado de plátano. *Agrociencia* 41(8).
- Zapata PJ, Guillén F, Martínez-Romero D, Castillo S, Valero D, Serrano M. 2008.** Use of alginate or zein as edible coatings to delay postharvest ripening process and to maintain tomato (*Solanum lycopersicon Mill*) quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 88(7):1287-1293.
- Zhang L, Deng X, Zhao S, Huang Z. 1997.** Biodegradable polymer blends of poly (3-hydroxybutyrate) and starch acetate. *Polymer International* 44(1):104-110.
- Zhong QP, Xia WS. 2008.** Physicochemical properties of edible and preservative films from chitosan/cassava starch/gelatin blend plasticized with glycerol. *Food Technology and Biotechnology* 46(3):262-269.

## ABREVIATURAS

<b>%</b>	Por ciento.
<b>μ</b>	Micras.
<b>μm.</b>	Micrómetros.
<b>°C</b>	Grados Celsius.
<b>°Brix</b>	Grados brix.
<b>ΔE</b>	Diferencial de color.
<b>a*</b>	Parámetro Hunter-Lab.
<b>A</b>	Área.
<b>AAG</b>	Almidón acetilado, gelatina y glicerol.
<b>ANOVA</b>	Análisis de varianza.
<b>AOAC</b>	Association of official Analytical Chemist.
<b>ANP</b>	Almidón nativo y glicerol.
<b>b*</b>	Parámetro Hunter-Lab.
<b>CC</b>	Cera de carnauba.
<b>CG</b>	Contenido de gelatina.
<b>Cm</b>	Centímetro.
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetro cuadrado.
<b>Col</b>	Colaboradores.
<b>CP</b>	Contenido de glicerol.
<b>CV</b>	Coefficiente de variación.
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono.
<b>D</b>	Deformación.

<b>DG</b>	Deseabilidad global.
<b>E</b>	Espesor.
<b>FAO</b>	Organización de Alimentos y Agricultura de las Naciones Unidas.
<b>FDA</b>	Food and Drug Administration.
<b>G</b>	Gramos.
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Agua.
<b>HR</b>	Humedad relativa.
<b>Kg</b>	Kilogramos.
<b>L</b>	Litro.
<b>L*</b>	Parámetro Hunter-Lab.
<b>LSD</b>	Least Significant Difference.
<b>M</b>	Metros.
<b>MEqA</b>	Peso Miliequivalente.
<b>Mg</b>	Magnesio.
<b>Mf</b>	Peso final.
<b>Mi</b>	Peso inicial.
<b>Min</b>	Minuto.
<b>MI</b>	Mililitros.
<b>Mm</b>	Milímetros.
<b>Mp</b>	Masa de humedad absorbida.
<b>MSR</b>	Metodología de Superficie de Respuesta.
<b>N</b>	Newton.
<b>N</b>	Normalidad.

<b>NaOH</b>	Hidróxido de sodio.
<b>NO<sub>3</sub></b>	Nitrato.
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxígeno.
<b>P</b>	Nivel de significancia.
<b>Pa</b>	Pascal.
<b>PC</b>	Película comestible.
<b>PM</b>	Peso fresco de la muestra.
<b>PP</b>	Pérdida de peso.
<b>Ppm</b>	Partes por millón.
<b>PVA</b>	Permeabilidad al vapor de agua.
<b>RC</b>	Recubrimiento Comestible.
<b>Rpm</b>	Revoluciones por minuto.
<b>RR</b>	Resistencia a la ruptura.
<b>S</b>	Solubilidad
<b>S</b>	Segundos.
<b>SST</b>	Solido soluble total.
<b>T</b>	Tiempo.
<b>T</b>	Temperatura.
<b>TE</b>	Temperatura de extrusión.
<b>V</b>	Volumen.
<b>VG</b>	Volumen gastado.
<b>VT</b>	Velocidad del tornillo.