



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

FACULTAD DE QUÍMICA

CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS COMESTIBLES A BASE
DE MUCÍLAGO DE NOPAL (*Opuntia ficus indica*) Y EVALUACIÓN
DE SU APLICACIÓN COMO RECUBRIMIENTO COMESTIBLE EN
CIRUELA (*Prunus salicina* L.) PARA SU CONSERVACIÓN EN
FRESCO

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA QUÍMICA – BIOINGENIERÍA

PRESENTA:

I.A. VICTOR MANUEL SALINAS SALAZAR

TUTOR:

DRA. MARÍA ANDREA TREJO MÁRQUEZ

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN



MÉXICO, D. F. ABRIL, 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dra. María del Carmen Wacher Rodarte	Facultad de Química
Secretario:	Dr. Alberto Tecante Coronel	Facultad de Química
Vocal:	Dr. Miquel Gimeno Seco	Facultad de Química
1 ^{er.} Suplente:	Dr. Arturo Navarro Ocaña	Facultad de Química
2 ^{do.} Suplente:	Dra. Ma. Andrea Trejo Márquez	FES - Cuautitlán

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Laboratorio de Postcosecha de Productos Vegetales. Facultad de Estudios Superiores (FES) Cuautitlán. Universidad Nacional Autónoma de México.

TUTOR DE TESIS

Dra. Ma. Andrea Trejo Márquez



FIRMA

DEDICATORIA

**A mi madre, a mi padre y a toda la comunidad a la que
pertenezco, por enseñarme a luchar.**

A l@s compañer@s que he encontrado en estos caminos.

**A las mujeres y hombres que lucharon y luchan desde abajo
para la construcción de otros mundos posibles.**

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de este trabajo de maestría.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a su facultad de Química por brindar las herramientas necesarias para una formación profesional.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) por la beca otorgada para la finalización del proyecto: Desarrollo de envases activos para la conservación de frutos frescos y mínimamente procesados (Clave: IT201513).

A la Dra. Elsa Gutiérrez Cortez por permitir el uso del equipo para la extracción del mucílago.

Al Dr. Alberto Tecante Coronel por el acceso al equipo para la realización de las pruebas mecánicas. Así como a la I.A. Mariana Ramírez Gilly y la Maestra Ixchel Gijón Arreortúa por todo el apoyo técnico brindado.

Al Dr. Joel Corrales García, de la Universidad Autónoma Chapingo, por el acceso al equipo para la medición de permeabilidad a gases.

A la bióloga Greta H. Rosas Saito, del Colegio de Postgraduados, por el acceso al Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido.

A la Maestra Adela Lira Vargas por toda la paciencia, dedicación y apoyo técnico para la realización de este trabajo.

A mi asesora, la Dra. María Andrea Trejo Márquez, por todo el apoyo, confianza, paciencia y dedicación para la realización de este trabajo.

A todos los miembros del jurado por sus valiosas sugerencias durante la revisión de este trabajo.

CONTENIDO

Agradecimientos	I
Índice de cuadros	VII
Índice de figuras	VIII
Resumen	1
Abstract	3
1. Introducción	4
2. Antecedentes	8
<i>2.1. Generalidades del nopal</i>	8
2.1.1. Clasificación botánica	9
2.1.2. Descripción morfológica	10
2.1.3. Importancia económica	12
2.1.4. Mucílago de nopal	14
<i>2.2. Generalidades de películas y recubrimientos comestibles</i>	19
2.2.1. Definición de película y recubrimiento comestible	20
2.2.2. Componentes principales para la elaboración de películas y recubrimientos comestibles	22
2.2.2.1. Polisacáridos	22
2.2.2.2. Proteínas	23
2.2.2.3. Lípidos	24
2.2.2.4. Mezclas	25

2.2.2.5. Aditivos	25
2.2.2.5.1. Plastificantes	25
2.2.2.5.2. Emulsionantes	26
2.2.2.5.3. Antimicrobianos	27
2.2.3. Métodos de preparación de películas y recubrimientos comestibles	27
2.2.4. Caracterización de las propiedades funcionales de películas y recubrimientos comestibles	29
2.2.4.1. Propiedades de Barrera	29
2.2.4.2. Propiedades mecánicas	32
2.2.5. Efectos fisiológicos en frutos	34
2.3. <i>Generalidades de la Ciruela</i>	36
2.3.1. Clasificación botánica	37
2.3.2. Importancia económica	37
2.3.3. Fisiología y cambios durante la maduración	39
2.3.4. Principales pérdidas poscosecha	41
2.3.5. Tratamiento poscosecha para la conservación de ciruela	42
3. Objetivos	44
3.1. Objetivo general	44
3.2. Objetivos particulares	44
4. Hipótesis	45
5. Materiales y Métodos	46

5.1. Cuadro Metodológico	46
5.2. Elaboración y caracterización de películas comestibles	47
5.2.1. Material biológico para la obtención de mucílago de nopal	47
5.2.2. Extracción de mucílago de nopal y su obtención en polvo	47
5.2.3. Elaboración de las películas comestibles	48
5.2.4. Caracterización de las películas comestibles	49
5.2.4.1. Propiedades físicas	49
5.2.4.1.1. Color	49
5.2.4.1.2. Transparencia (Transmisión de luz)	50
5.2.4.1.3. Espesor	50
5.2.4.2. Propiedades de barrera	50
5.2.4.2.1. Permeabilidad al vapor de agua	50
5.2.4.2.2. Permeabilidad a gases	51
5.2.4.3. Propiedades mecánicas	52
5.2.4.4. Estructura microscópica	53
5.3. Aplicación del recubrimiento comestible en ciruela fresca	53
5.3.1. Material biológico	53
5.3.2. Tratamiento de la muestra	54
5.3.3. Parámetros de calidad	54
5.3.3.1. Pérdida de peso	54
5.3.3.2. Firmeza	55

5.3.3.3. Sólidos solubles	55
5.3.3.4. pH y % acidez titulable	55
5.3.3.5. Determinación de color	55
5.3.4. Análisis sensorial	55
5.3.5. Parámetros fisiológicos	56
5.3.5.1. Respiración	56
5.3.5.2. Desordenes Fisiológicos	56
5.4. Análisis estadístico	57
6. Resultados y discusión	58
6.1. Caracterización de las películas comestibles	58
6.1.1. Propiedades físicas	58
6.1.1.1. Color	58
6.1.1.2. Transparencia (Transmisión de luz)	63
6.1.1.3. Espesor	65
6.1.2. Propiedades de barrera	68
6.1.2.1. Permeabilidad al vapor de agua	68
6.1.2.2. Permeabilidad a gases	71
6.1.3. Propiedades mecánicas	75
6.1.4. Estructura microscópica	83
6.2. Aplicación del recubrimiento comestible en ciruela fresca	90
6.2.1. Parámetros de calidad	90

6.2.1.1. Pérdida de peso	91
6.2.1.2. Firmeza	93
6.2.1.3. Sólidos solubles	96
6.2.1.4. pH	97
6.2.1.5 Acidez	99
6.2.1.6. Color	101
6.2.2. Análisis sensorial	107
6.2.3. Parámetros fisiológicos	111
6.2.3.1. Respiración	111
6.2.3.2. Desordenes fisiológicos	113
7. Conclusiones	118
8. Recomendaciones	121
Bibliografía	122
Apéndice A. Propiedades mecánicas	143
Apéndice B. Propiedades físicas, de barrera y mecánicas de diferentes películas comestibles elaboradas con base en mucílago de nopal	145
Apéndice C. Efectos de la aplicación de recubrimientos comestibles en los parámetros de calidad y fisiológicos en ciruela (<i>Prunus salicina</i> L.)	146
Apéndice D. Películas de formulaciones evaluadas	147

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación Taxonómica del Nopal.	9
Cuadro 2. Composición química del mucílago del nopal de <i>Opuntia ficus indica</i> .	16
Cuadro 3. Metodologías para la extracción del mucilago de nopal.	17
Cuadro 4. Propiedades funcionales en películas y recubrimientos comestibles.	21
Cuadro 5. Clasificación Taxonómica de la ciruela.	37
Cuadro 6. Recubrimientos comestibles aplicados en ciruela.	43
Cuadro 7. Formulación de las películas comestibles de mucílago de nopal.	48
Cuadro 8. Escala hedónica de 5 puntos para diferentes características sensoriales.	56
Cuadro 9. Caracterización física de las ciruelas de estudio.	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planta de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>).	11
Figura 2. Cultivo de la planta de nopal.	13
Figura 3. Estructura parcial propuesta para el mucílago de <i>Opuntia ficus indica</i> .	15
Figura 4. Señal de equipo de pruebas SINTECH 1/s durante punción o extensión de una película.	34
Figura 5. . Producción nacional de ciruela reportada por estados según el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera.	38
Figura 6. Proceso de extracción del mucílago de nopal.	48
Figura 7. Máquina de pruebas mecánicas SINTECH 1/S.	53
Figura 8. <i>Luminosidad</i> de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal.	58
Figura 9. <i>Chroma</i> de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal.	60
Figura 10. <i>Hue</i> de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal.	62
Figura 11. Transparencia de películas comestibles a base de mucílago de nopal.	64
Figura 12. Espesor de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal.	66
Figura 13. Permeabilidad a vapor de agua de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal.	68
Figura 14. Permeabilidad a gases (O ₂) de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal.	72
Figura 15. Permeabilidad a gases (CO ₂) de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal.	73

Figura 16. Fuerza de fractura en la Extensión (MPa) de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal.	76
Figura 17. Fuerza de fractura en la Punción (MPa) de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal.	80
Figura 18. Imágenes de microscopia electrónica de barrido de diferentes películas elaboradas a base de mucílago de nopal en su sección transversal y dos tomas superficiales de 1500x y 3000x.	84
Figura 19. Apariencia visual inicial de las ciruelas.	90
Figura 20. Evolución de la pérdida de peso (%) en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos a 1 °C durante 30 días más 6 días a 25 °C.	92
Figura 21. Evolución de la Firmeza (MPa) en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos a 1 °C durante 30 días más 6 días a 25 °C.	94
Figura 22. Evolución de los sólidos solubles (°Brix) en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos a 1 °C durante 30 días más 6 días a 25 °C.	96
Figura 23. Evolución del pH en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos a 1 °C durante 30 días más 6 días a 25 °C.	98
Figura 24. Evolución de la acidez en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos a 1 °C durante 30 días más 6 días a 25 °C.	100
Figura 25. Evolución de la <i>luminosidad</i> en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos a 1 °C durante 30 días más 6 días a 25 °C.	102
Figura 26. Evolución del <i>chroma</i> en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos a 1 °C durante 30 días más 6 días a 25 °C.	104
Figura 27. Evolución del tono en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos a 1 °C durante 30 días más 6 días a 25 °C.	105

- Figura 28.** Propiedades sensoriales en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos en el día inicial de almacenamiento. **108**
- Figura 29.** Propiedades sensoriales en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos durante 30 días de almacenamiento a 1 °C. **109**
- Figura 30.** Evolución de la respiración (mg CO₂/kg*h) en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos a 1 °C durante 30 días más 6 días a 25 °C. **111**
- Figura 31.** Evolución de la presencia de pigmentación roja o “bleeding” en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos a 1°C durante 30 días más 6 días a 25 °C. **115**
- Figura 32.** Evolución de la presencia de pardeamiento interno en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos a 1 °C durante 30 días más 6 días a 25 °C. **116**
- Figura 33.** Evolución de la presencia de transparencia o gel breakdown en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos a 1 °C durante 30 días más 6 días a 25 °C. **116**
- Figura 34.** Evolución de la presencia de daños por frío en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos a 1 °C durante 30 días más 6 días a 25 °C. **117**

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue desarrollar películas comestibles (PC) a base de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) variedad “Milpa Alta” con un componente proteínico (grenetina) y uno lipídico (cera de abeja), así como caracterizar sus propiedades físicas, mecánicas, de barrera y estructura microscópica para seleccionar la formulación más apropiada y aplicarla como recubrimiento comestible (RC) en ciruela (*Prunus salicina* L.) para su conservación en fresco.

La elaboración de las películas comestibles se llevó a cabo por vaciado sobre una superficie plana y evaporación de la fase acuosa a temperatura ambiente. La formulación de cada película tuvo un efecto significativo ($p < 0.05$) en todas las propiedades evaluadas. El aumento en el número de componentes, además de la adición de cera de abeja, disminuyó la luminosidad, saturación y transparencia en PC, aunque aumentó el espesor de las mismas. La adición de cera de abeja contribuyó a disminuir la permeabilidad al vapor de agua (PVA) y a gases de las PC. La disminución de la permeabilidad a gases se debe al aumento de grosor que presentaron las películas por la adición de la cera de abeja, además de sus diferencias estructurales analizadas por microscopia electrónica de barrido y en donde las películas con este componente mostraron menores grietas y aunque presentaron una apariencia más rugosa, su estructura fue más cerrada y compacta. Las películas con 0.5% (p/v) de mucílago de nopal, 0.5% (p/v) de grenetina y 0.5% (p/v) de cera de abeja presentaron la menor PVA ($6.547 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{kPa}$) y a gases ($6173.098 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{kPa}$ para O_2 y $3923.159 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{kPa}$ para CO_2 , respectivamente). El esfuerzo de fractura en extensión y punción se incrementó al aumentar la cantidad de mucílago de nopal en combinación con un alto porcentaje de grenetina, y disminuyó con la adición de cera de abeja. Las películas con dos componentes (1.5% (p/v) de grenetina con 0.5, 1 y 1.5% (p/v) de mucílago de nopal) presentaron el mayor esfuerzo de extensión y punción (8.01-9.05 y 0.25-0.36 MPa, respectivamente).

Las películas elaboradas con 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina y 0.5% de cera de abeja y de 1.5% de mucílago de nopal con 1% de grenetina fueron seleccionadas para ser aplicadas como RC en ciruelas almacenadas por 30 días a 1°C y transferidas a 25°C por 6 días. Los RC con 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina y 0.5% de cera de

abeja mejoraron la calidad poscosecha de las ciruelas reduciendo su pérdida de peso y firmeza. Sin embargo, su aplicación no ayudó a disminuir la intensidad respiratoria y el aumento en sólidos solubles ni a mantener el color y acidez adecuados para una buena calidad en estas frutas. Por otro lado, el uso de los dos RC disminuyó la incidencia de sangrado o “bleeding”, pardeamiento interno y transparencia o “gel breakdown” en las ciruelas, lo que podría deberse a una modificación de la atmósfera interna producido por los recubrimientos. Finalmente, el uso de RC a base de 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina y 0.5% de cera de abeja mejoró la apariencia final de las ciruelas recubiertas, lo que tiene una implicación importante en la comercialización de este fruto, pues favorece la atracción por parte de los consumidores.

Abstract

The aim of this work was to develop and characterize edible films based on mucilage of cactus (*Opuntia ficus indica*) var. Milpa Alta, gelatin and beeswax in different concentrations, whose physical, mechanical, barrier properties as well as its microscopic structure were evaluated to select the most appropriate formulations to be used as an edible coating in the postharvest quality of plums (*Prunus salicina* L.). The formulation of each film had a significant effect ($p < 0.05$) for all properties evaluated. The increase in the number of components, besides the addition of beeswax, produced a decrease in lightness, saturation and transparency in edible films, although increased the thickness. Addition of beeswax reduced water vapor (WVP) and gas permeability. Decreasing in gas permeability may be due to the increased film thickness presented by the addition of beeswax as well as by their structural differences analyzed by scanning electron microscopy. Films containing this component showed lower cracks and although had a rougher appearance, its structure was more closed and compact. Edible films with 0.5% (w/v) mucilage, 0.5% (w/v) beeswax and 0.5% (w/v) gelatin had the lowest WVP ($6.547 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{kPa}$) and gas permeability ($6173.098 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{kPa}$ for O_2 y $3923.159 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{kPa}$ for CO_2 , respectively). The fracture force in puncture and tension increased with the increase in mucilage and gelatin concentrations and decreased with the addition of beeswax. Edible films with 1.5% (w/v) gelatin and 0.5, 1 and 1.5% (w/v) of mucilage had the best mechanical properties ($8.01\text{-}9.05$ and $0.25\text{-}0.36$ MPa in tension and puncture, respectively). Films containing 0.5% mucilage with 0.5% gelatin and 0.5% beeswax and 1.5% mucilage with 1% gelatin were selected to be applied as an edible coating on plum stored 5 weeks at 1°C and transferred to 25°C for 1 week. Edible films with 0.5% mucilage with 0.5% gelatin and 0.5% beeswax improved postharvest quality of coated plum, reducing weight loss and firmness. However, this coating did not significantly improve respiratory rate, soluble solids, color and acidity of this fruit. On the other hand, both edible coatings also reduced physiological disorders (bleeding, gel breakdown and browning) which could be related to the ability of coatings to create a modified atmosphere in the fruit. Finally, edible coating containing 0.5% mucilage, 0.5% gelatin and 0.5% beeswax improved final appearance of plum fruit which has an important implication in the marketing of this fruit, since it stimulates the attraction for consumers.

INTRODUCCIÓN

La ciruela fresca es un alimento con un aporte nutrimental considerable, pues además de su baja cantidad de grasa y a ser una buena fuente de fibra dietética, aporta una amplia variedad de vitaminas como la A, B-6, C, E, K, tiamina, riboflavina, niacina, ácido pantoténico, además de algunos minerales como el calcio, magnesio, fósforo y potasio (Hui, 2006). Asimismo, se ha reportado que la ciruela tiene un alto contenido de fitoquímicos (los cuales funcionan como antioxidantes naturales que ayudan a reducir los riesgos de cáncer) y que el consumo de este fruto reduce el riesgo de hipertensión y otras enfermedades crónicas (Díaz-Mula *et al.*, 2011; Usenik *et al.*, 2008; Crisosto *et al.*, 2002; Ames *et al.*, 1995). Sin embargo, las ciruelas son altamente perecederas y sufren un rápido deterioro reflejado en su reblandecimiento o disminución de firmeza, pérdida de agua y putrefacción. Las condiciones de almacenamiento comercial (-0.5-1 °C y 85-95% H.R.) pueden retrasar el proceso de reblandecimiento, aunque muchas de las veces provocan el desarrollo de desórdenes fisiológicos durante el mismo. Estos desórdenes son: oscurecimiento de la pulpa o pardeamiento, pérdida de jugosidad por harinosidad, translucidez en la pulpa (“gel breakdown”), acumulación de pigmento o aparición de tintes rojos en la pulpa (“bleeding”). Muchas de las veces estos desórdenes son mencionados como daños por frío y no son detectados en los frutos hasta que estos son removidos del almacén y puestos a temperaturas de comercialización o ambiente (Eum *et al.*, 2009; Yahia, 2009; Candan *et al.*, 2008; Hui, 2006; Crisosto y Kader, 2002; Crisosto *et al.*, 1999;). Además, existen otras alteraciones que reducen la calidad poscosecha de la fruta, como las enfermedades de Moho gris, causado por *Botrytis cinerea* y la pudrición parda causada por *Monilia fructicola*, que es la enfermedad de poscosecha más importante de las frutas de carozo (Goncalves *et al.*, 2010; Yahia, 2009; Crisosto *et al.*, 2002).

En México, la producción de ciruela en el año 2011 fue de aproximadamente 14,972.05 hectáreas con una producción total de 70,676.90 toneladas, siendo Michoacán, Chiapas, Jalisco y Puebla los estados que aportaron la mayor producción a nivel nacional (SIAP, 2013), sin embargo la mayor parte de este producto se comercializa sin ningún tratamiento que le ayude a aumentar el tiempo de vida poscosecha, dejándolo como un producto altamente perecedero con una vida de anaquel muy corta (de 8 a 10 días) y por ende con un

periodo reducido de comercialización (ASERCA, 2002). Aunque cabe señalar, que se han realizado estudios en otros países en donde algunos cultivares de ciruela han mostrado una mejora en la vida poscosecha por el uso de películas y/o cubiertas comestibles (Valero *et al.*, 2013; Navarro-Tarazaga *et al.*, 2011; Eum *et al.*, 2009; Reinoso *et al.*, 2008; Navarro-Tarazaga *et al.*, 2008; Navarro-Tarazaga *et al.*, 2004; Pérez-Gago *et al.*, 2003).

Una película comestible (PC) es una estructura formada por varias capas delgadas y continuas de materiales que pueden ser ingeridos por el ser humano, actúan principalmente como barrera a la transferencia de humedad, oxígeno, dióxido de carbono, aroma y lípidos, son un medio para transportar aditivos (antimicrobianos, antioxidantes, saborizantes, etc.) y ayudan a mejorar las características de manipulación e integridad estructural del alimento (Krochta y De Mulder-Johnston, 1997). Por otro lado, un recubrimiento comestible (RC) puede ser definido como una capa delgada de material que cubre la superficie del alimento y puede ser consumida como parte de todo el producto, mientras que una PC es una capa delgada preformada, la cual una vez constituida puede ser puesta sobre o entre los componentes del alimento (McHugh, 2000; Guilbert *et al.*, 1996). La principal diferencia es que los RC son aplicados en forma líquida (usualmente por inmersión) sobre el alimento, mientras que las PC se moldean primero como laminas sólidas que son luego aplicadas en forma de envoltura (Falguera *et al.*, 2011).

En el caso de frutas y vegetales, la aplicación de RC es uno de los métodos que ayuda a aumentar la vida de anaquel de las mismas, actuando como barrera al transporte de gases como O₂, CO₂ y vapor de agua, teniendo un efecto similar al de atmósferas controladas o modificadas, reduciendo la tasa de respiración y transpiración y retardando los procesos de senescencia en las frutas (Valero *et al.*, 2013; Park, 1999).

Los principales componentes de las películas y recubrimientos comestibles pueden clasificarse, básicamente, en tres categorías principales; hidrocoloides (proteínas y polisacáridos), lípidos y mezclas o combinaciones de las dos anteriores (Badlwin, *et al.*, 2012; Tharanathan, 2003). La elaboración de PC y RC a partir de la mezcla de polisacáridos, proteínas y/o lípidos permite aprovechar las características funcionales distintas de cada compuesto, además de disminuir las desventajas de cada uno (Vargas *et al.*, 2008; Kester y Fennema, 1986). Algunas de las combinaciones que se utilizan son;

proteínas y polisacáridos, proteínas y lípidos, carbohidratos y lípidos o polímeros sintéticos y polímeros naturales. Los objetivos principales que se buscan al hacer estas combinaciones son mejorar sus propiedades mecánicas y de permeabilidad a gases y/o vapor de agua (Bourtoom, 2008).

Los polisacáridos capaces de formar geles en agua son comunes en el reino de las plantas. Muchos de estos polisacáridos como las pectinas, carrageninas, alginatos y xantana han sido investigados de manera considerable en su aplicación para su uso en películas y/o recubrimientos comestibles. Recientemente, uno de los polisacáridos que se le ha dado importancia para su aplicación en películas y/o recubrimientos comestibles es el mucílago obtenido del nopal *Opuntia ficus indica* (Espino-Díaz *et al.*, 2010; Del-Valle *et al.*, 2005).

En México existen 3 millones de hectáreas de nopal silvestre y 233,000 hectáreas de nopal cultivado, de los cuales 150,000 son usadas para forraje y aproximadamente 13,000 son cultivadas para la obtención de su fruto (Espino-Díaz *et al.*, 2010). La variedad que se cultiva principalmente en nuestro país es la Milpa Alta, nombre que se le da por el lugar donde se cultiva: Milpa Alta, Ciudad de México (SAGARPA, 2007). Sin embargo, el uso de las cactáceas como fuente de goma es muy reducida y comercialmente sólo se conoce el uso de la goma de cholla, la cual es extraída de la planta *Opuntia fulgida* y es usada como adhesivo. Las posibilidades para utilizar el mucílago, el cual es un polisacárido de esta cactácea, son muy interesantes dada la similitud que presenta en su estructura química con algunas gomas comerciales como las pectinas (Medina Torres, 2005). El mucílago es un polisacárido, con un peso molecular del orden de 2.3×10^4 a 4.3×10^6 Da, que contiene D-galactosa, L-arabinosa, D-xilosa, L-ramnosa y ácido-D-galacturónico y es un compuesto muy complejo con la capacidad de formar redes moleculares y retener fuertemente grandes cantidades de agua (Medina-Torres *et al.*, 2000; Trachtenberg y Meyer, 1982).

Sin embargo, aunque en los últimos años se ha empezado a investigar el uso de mucílago de nopal en la elaboración de PC (Espino-Díaz *et al.*, 2010; Abraján-Villaseñor, 2008; Del-Valle *et al.*, 2005) aún no ha sido estudiada su capacidad para ser aplicados en frutas como la ciruela, pues a pesar de que la información tecno-científica para la elaboración de películas y/o recubrimientos comestibles está disponible y es muy amplia, no es universal

para todos los productos, lo que implica un reto para el desarrollo de recubrimientos y/o películas específicas para cada producto deseado.

Es por lo antes mencionado que en el presente trabajo se plantea el desarrollo y caracterización de películas comestibles a base de mucílago de nopal con la finalidad de que los resultados de este estudio puedan establecer a este compuesto como una opción para el desarrollo de PC o RC en países como México, donde el nopal es altamente producido a bajo costo, constituyendo un proceso alternativo para el mismo y una fuente de ingresos para las comunidades productoras debido a que se le daría una valoración económica mayor.

Por otro lado, se busca también establecer la aplicación de películas y/o recubrimientos comestibles a base de mucílago de nopal como una alternativa para aumentar la vida de anaquel de ciruela manteniendo sus características de fruta fresca y así contribuir a ampliar el aprovechamiento de este fruto para su comercialización, además de poder contribuir a reducir la necesidad de polímeros sintéticos de degradación lenta utilizados para su conservación.

2. ANTECEDENTES

2.1. GENERALIDADES DEL NOPAL

Las cactáceas son originarias del continente Americano, siendo México un país considerado centro de biodiversidad por excelencia (Paredes-López *et al.*, 2006). En este país se les conoce desde hace mucho tiempo y fueron tan importantes que encontramos representaciones de numerosas especies en códices prehispánicos, monumentos, pinturas y cerámicas. Por ejemplo, en el escudo de México figura un águila posada sobre un nopal, símbolo que ha llegado hasta nuestros días del jeroglífico de la Gran Tenochtitlán (ciudad capital del Imperio azteca, hoy ciudad de México) y que significa *sitio del nopal que crece sobre la piedra* (Granados y Castañeda, 2000; Flores-Valdez, 2003). El interés del ser humano por los nopales viene de miles de años. Su origen e historia están íntimamente relacionados con las antiguas civilizaciones mesoamericanas, en particular con la cultura azteca como ya se mencionó anteriormente. Además, existen evidencias arqueológicas que permiten afirmar que fueron las poblaciones indígenas asentadas en las zonas semiáridas de Mesoamérica las que iniciaron su cultivo de modo formal (Pimienta, 1990). La evidencia del conocimiento y uso del nopal por los primeros pobladores mexicanos se encuentra en las excavaciones de Tamaulipas y Tehuacán, Puebla, donde se encontraron semillas y cáscaras de tuna fosilizadas, así como fibras de pencas de nopal, de una antigüedad aproximada de siete mil años (Flores-Valdez, 2003).

En México encontramos el mayor número de géneros y especies de toda América, vale la pena mencionar que de las 1600 especies que forman esta familia, en México habitan 1088 (Ríos y Quintana, 2004).

Los nopales son originarios de América tropical y subtropical y hoy día se encuentran en una gran variedad de condiciones agroclimáticas, en forma silvestre o cultivada, en todo el continente americano. Además, a partir de que los conquistadores las llevaron a Europa en el siglo XVI y su cultivo y naturalización se dio principalmente en España e Italia, se han difundido a gran parte de Europa, África, Asia y Oceanía donde también se cultivan o se encuentran en forma silvestre. En México los nopales se encuentran desde el norte hasta el

centro del país y alcanzan su mayor complejidad y riqueza en el Altiplano central (Paredes-López *et al.*, 2006; Sáenz *et al.*, 2006).

Los nopales pertenecen a la familia *Cactaceae* comúnmente conocidas como cactáceas o cactus. El nopal es endémico de América y existen aproximadamente 258 especies reconocidas, de las cuales aproximadamente 100 se encuentran en México, país que cuenta con plantaciones especializadas para consumo humano (Ríos y Quintana, 2004; Paredes-López *et al.*, 2006).

2.1.1. Clasificación botánica

En México se le llama nopal a varias especies del género “*Opuntia*” de la familia “*Cactaceae*” (Cuadro 1). En el libro *Cactáceas de México* de Helia Bravo (1978) para los nopales se presentan 2 géneros *Opuntia* y *Nopalea*. En México el género *Opuntia* presenta 5 subgéneros, 17 series y 104 especies. El género *Nopalea* presenta 10 especies, de las cuales la “*Nopalea cochenillifera*” se utiliza como Nopal verdura. En resumen: de las 104 especies de *Opuntia* y 10 de *Nopalea*, se utilizan para forraje 15 especies, 5 para fruta y 3 para verdura; 2 de *Opuntia* y una de *Nopalea* (Ríos y Quintana, 2004; Paredes-López *et al.*, 2006).

Cuadro 1. Clasificación Taxonómica del nopal.

Reino	Vegetal
SubReino	Embryophita
División	Angiospermae
Clase	Dicotyledonea
Subclase	Dialipetalas
Orden	<i>Opuntiales</i>
Familia	Cactaceae
Subfamilia	Opuntioideae
Tribu	<i>Opuntiae</i>
Género	<i>Opuntia</i> y <i>Nopalea</i>

Fuente: Ríos y Quintana (2004)

El género *Opuntia* debe su nombre a un pueblo antiguo de Grecia llamado Opus u Opuncia, de la región de Leócrida, Beocia, donde se dice que crecía una planta similar a las

cactáceas. El nombre científico le fue asignado por Tournefort en 1700 (Scheinvar, 1999; Velásquez, 1998).

A pesar de conocerse casi 300 especies del género *Opuntia*, hay sólo 10 ó 12 especies hasta ahora utilizadas por el hombre, ya sea para producción de fruta, nopalitos para alimentación humana, forraje o cochinilla para obtención de colorante. Como especies cultivadas para producción de fruta se encuentran: *Opuntia ficus indica*, *O. amyclaea*, *O. xocostle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*. Como especies silvestres: *Opuntia hyptiacantha*, *O. leucotricha* y *O. robusta*. De las especies anteriores, la más ampliamente cultivada en distintas partes del mundo es *Opuntia ficus indica* (Uzun, 1996). Las características de estas especies son variables, diferenciándose en la forma de los cladodios, en la presencia o ausencia de espinas, en el tamaño y color de los frutos (Scheinvar, 1999). Los brotes tiernos (nopalitos) de *Opuntia ficus indica* y de otras especies se utilizan, principalmente en México, para la producción de nopal verdura para consumo humano. Sin embargo, esta misma especie también es utilizada para la obtención de forraje, en países como Brasil, Chile y México, entre otros (Sáenz *et al.*, 2006).

La *Opuntia ficus indica* es la especie cultivada de mayor importancia comercial para la producción de nopalito. De acuerdo con la FAO, entre las variedades de *Opuntia* cultivadas comercialmente en México se encuentran: *Milpa Alta*, *COPENA V-1*, *COPENA F-1*, *Atlixco*, *Jalpa*, *Esmeralda* y *Blanco de Valtierrilla* (Sáenz *et al.*, 2006; Lira-Vargas, 2012).

2.1.2. Descripción morfológica

La succulencia es la principal característica morfológica de los nopales y de la mayoría de las cactáceas. El nopal, al igual que casi todas las cactáceas, es una planta que no tiene hojas (Figura 1). Son plantas arbustivas, rastreras o erectas que pueden alcanzar 3.5 a 5 m de altura (Sudzuki, 1999).



Figura 1. Planta de nopal (*Opuntia ficus indica*)
Fuente: SNWA (2012)

El sistema radicular es una parte extensa, densamente ramificada, rica en raíces finas absorbentes y superficiales en zonas áridas de escasa pluviometría. La longitud de las raíces está en relación con las condiciones hídricas y con el manejo cultural, especialmente el riego y la fertilización (Sudzuki, 1999).

Los tallos o cladodios, comúnmente llamados pencas, presentan forma de raqueta ovoide o alongada alcanzando hasta 60-70 cm de longitud y 25 cm de ancho dependiendo del agua y los nutrientes disponibles. Estos se encuentran protegidos por una cutícula gruesa que en algunas ocasiones está cubierta de cera o pelos que ayudan a disminuir la pérdida de agua. Los cladodios presentan además espinas, presentando pocas estomas por unidad de superficie con la particularidad de permanecer cerrados durante el día, evitando así la pérdida de agua por transpiración, y abiertos en la noche favoreciendo la entrada de anhídrido carbónico, indispensable para la fotosíntesis (Sudzuki *et al.*, 1999; Paredes-López *et al.*, 2006). La parte interior de las pencas está formado por la clorénquima donde se lleva a cabo la fotosíntesis y la parénquima con la principal función de almacenar agua lo que permite a las plantas soportar largos periodos de sequía (Sáenz, 2004).

Las aréolas se encuentran en ambas caras del cladodio, se presentan en forma de yemas que tienen la capacidad de desarrollar nuevos cladodios, flores y raíces aéreas, según las condiciones ambientales. Presentan en su cavidad espinas, que generalmente son de dos tipos: algunas pequeñas, agrupadas en gran número (gloquidios o comúnmente llamados

aguates) y las grandes que algunos autores llaman hojas modificadas (Granados y Castañeda, 2000).

El fruto es una falsa baya con ovario ínfero simple y carnoso. La forma y tamaño de los frutos, conocidos como tunas, es variable, los hay ovoides, redondos, elípticos y oblongos, con los extremos aplanados, cóncavos o convexos (Sáenz, 2006).

Finalmente las flores son sésiles, hermafroditas y solitarias, se desarrollan normalmente en el borde superior de las pencas. Su color es variable: hay rojas, amarillas, blancas, entre otros colores (Sudzuki, 1999).

2.1.3. Importancia económica

Los principales países donde el cultivo de nopal es comúnmente conocido son: México, Argentina, Perú, Bolivia, Brasil, EE.UU., España, Italia, Marruecos, Túnez, Etiopía, Israel y Sudáfrica (Sáenz, 2004). Siendo considerado México el centro de origen del nopal y en donde la mayoría de las 104 especies del género *Opuntia* crecen de manera silvestre, de las cuales 60 son endémicas (Labra *et al.*, 2003; Griffith, 2004).

En el país se utilizan, principalmente, tres sistemas de producción: 1) Nopaleras silvestres; distribuidas en suelos pobres y/o zonas áridas o semiáridas en estados como Sonora, Baja California Sur, Sinaloa y Chihuahua. Utilizadas principalmente como forraje para el ganado. 2) Nopaleras en huertos familiares; De gran relevancia en Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato y Aguascalientes. Su producción es para autoconsumo y comercialización en mercados regionales. 3) Plantaciones comerciales; Con dos sistemas de producción: *el sistema tradicional y el sistema de micro túneles o sistema intensivo*. El primero tiene densidades de plantación de 15 a 40 mil plantas por hectárea (Figura 2), mientras que el segundo emplea densidades de plantación de 120 a 160 mil plantas por hectárea, permitiendo altos rendimientos durante los meses más fríos del año (ASERCA 2011; Sáenz *et al.*, 2006).



Figura 2. Cultivo de la planta de nopal
Fuente: olx (2013)

En 2011, el nopal cubrió una superficie sembrada de 12, 644.61 ha con una superficie cosechada de 12,179.51 ha, mostrando un crecimiento mayor del 40% en la superficie desde el año 2000. La producción de las áreas cultivadas se ha incrementado a la par de la superficie y el rendimiento. Mientras que en el año 2000 se produjeron 405 mil toneladas (t), en el año 2011 la producción alcanzó las 777,413. 00 t y con un valor de producción de \$1,340,602.90 pesos lo que representa un crecimiento de más del 80%. Por otro lado, el rendimiento promedio a nivel nacional paso de 47.2 t/ha en el año 2000 a 63.83 t/ha en 2011. El rendimiento más alto en la producción de nopalito lo alcanzó el estado de Morelos con 82.97 t/ha, seguido del estado de México, el Distrito Federal, Hidalgo y Puebla con 82.30, 78.84, 69.94 y 57.78 t/ha, respectivamente (SIAP-SAGARPA, 2013).

En México 27 estados producen nopalitos, con el Distrito Federal a la cabeza de la producción nacional con 4,331.00 ha sembradas y con una producción de 341,454.30 toneladas. Otras entidades cuya producción es importante, son los estados de Morelos, el estado de México, Baja California, Jalisco y Puebla con 269,555.00, 64,438.00, 26,515.11, 23,491.13 y 8,175.50 toneladas, respectivamente (SIAP-SAGARPA, 2013).

2.1.4. Mucílago de nopal

La epidermis del nopal tiene dos capas, una de células verdes llamada clorénquima y otra capa interna, formada por un cilindro de células blancas, conocida como parénquima. Su función principal es el almacenamiento de agua (Granados y Castañeda 2000). Dentro de los tejidos de la clorénquima y de la parénquima existen células mucilaginosas que almacenan el mucílago, estas células parecen ser más abundantes en la parénquima (Nobel, 2002). Trachtenberg y Mayer (1981) han demostrado que el mucílago solo está presente en el aparato de golgi y que su síntesis probablemente se lleva a cabo en él.

El mucílago es un hidrocoloide el cual forma enlaces moleculares que son capaces de retener una gran cantidad de agua. Este hidrocoloide puede ser extraído de la penca (y también de la cáscara del fruto) del nopal, aunque con rendimientos muy variables y a veces muy bajos desde 0.07% (Cárdenas *et al.*, 1997) hasta del 1.56% (Sepúlveda *et al.*, 2007). Cuando está hidratado, este polisacárido es altamente susceptible al ataque microbiano debido a su composición y alta actividad de agua (>0.8), por lo que su vida útil es de 2 a 3 días a 25 °C, por ello, para su conservación es conveniente deshidratarlo (Sepúlveda *et al.*, 2007; León-Martínez *et al.*, 2010).

El mucílago de nopal es un polisacárido complejo con un alto peso molecular (2.3×10^4 - 13.3×10^6 g/mol), conformado principalmente por los siguientes monómeros en diversas proporciones; L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa y xilosa, así como de ácido galacturónico. La proporción de estos monómeros en la molécula depende de varios factores como son la variedad, edad y las condiciones ambientales. En el caso del mucílago obtenido de *Opuntia ficus indica* se ha reportado su composición con aproximadamente 24.6–42% de arabinosa, 21–40.1% de galactosa, 8–12.7% de ácido galacturónico, 7–13.1% de ramnosa y 22–22.2% de xilosa, además de otros minerales presentes como Ca^{2+} y K^+ (Abraján-Villaseñor, 2008; Sepúlveda *et al.*, 2007; Sáenz *et al.*, 2004).

Las unidades de azúcares del mucílago forman un polisacárido ramificado de ácido galacturónico y ramnosa como unidades centrales. Las cadenas laterales tienen a su vez un esqueleto formado de -galactosa, el cual se encuentra unido a ramnosa en el eje central, y

ramificaciones laterales con unidades de arabinosa, xilosa y galactosa (Medina-Torres, 2005; Sáenz *et al.*, 2004). Su estructura parcial se presenta en la figura 3.

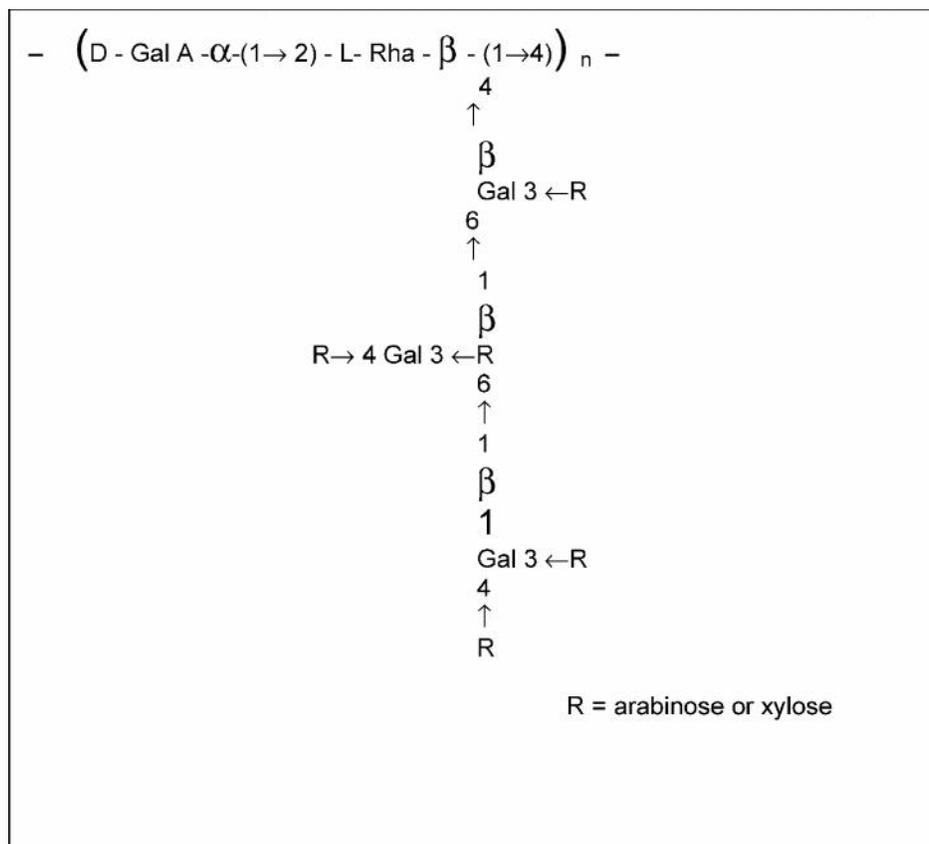


Figura 3. Estructura parcial propuesta para el mucílago de *Opuntia ficus indica*.
Fuente: Sáenz *et al.* (2004).

Asimismo, existe una propuesta sobre la estructura del mucílago que incluye dos distintas fracciones solubles en agua; la primera es una pectina con propiedades gelificantes con Ca^{2+} y la otra es un mucílago sin propiedades gelificantes (Sáenz *et al.*, 2004). Según Majdoub *et al.* (2001a) la fracción de polisacáridos solubles en agua con propiedades espesantes en *Opuntia ficus indica* es menor del 10% del material soluble en agua.

En el siguiente cuadro se muestra la composición química del mucílago de nopal reportada en algunos trabajos.

Cuadro 2. Composición química del mucílago del nopal de *Opuntia ficus indica* (g/100 g de muestra).

Referencia	Solvente	Humedad	Proteína	Carbohidratos	Grasa	Cenizas	Nitrógeno	Calcio	Potasio
Sepúlveda <i>et al.</i> (2007)	Etanol	4.90 ± 0.6	7.90 ± 1.5	No reportado	No reportado	36.2 ± 2.3	1.26 ± 0.2	10.90 ± 0.7	1.63 ± 0.2
	Isopropanol	5.50 ± 1.1	6.10 ± 0.7	No reportado	No reportado	39.1 ± 2.4	0.98 ± 0.1	12.67 ± 1.6	2.01 ± 0.3
Abraján-Villaseñor (2008)	Acetona	No reportado	3.00 ± 0.1	68.9 ± 0.9	0.9 ± 0.0	25.9 ± 0.7	No reportado	2.6 ± 0.0	0.89 ± 0.25
Espino-Díaz <i>et al.</i> (2010)	Etanol	12.43	1.04	64.15	2.3	20.08	No reportado	3.10	No reportado

Por otro lado, las metodologías de extracción de mucílago de nopal señaladas en los diferentes estudios realizados es muy variada, partiendo desde procesos muy simples como las señaladas por Arizmendi-Cotero (2004) hasta otras más complicadas como la utilizada por Habibi *et al.* (2005) con rendimientos muy variables (cuadro 3). Sin embargo, también se han realizado investigaciones para optimizar el proceso de extracción estudiando la proporción nopal/agua, las condiciones de extracción (tiempo y temperatura) y precipitación del mucílago, tipo de alcohol y proporciones de agua/alcohol (Sepúlveda *et al.*, 2007).

Cuadro 3. Metodologías para la extracción del mucílago de nopal.

Referencia	Método de extracción	Rendimiento
Arizmendi-Cotero (2004)	Molienda de nopal, tratamiento térmico a 90 °C/10 min, centrifugado a 2500 rpm., precipitado del mucílago con etanol, secado y molienda.	24.13% ± 1.5 (sobre la materia seca)
Medina-Torres (2005)	Molienda de nopal, centrifugado a 10,000 rpm, decantado, precipitado con acetona a una relación 1:2, pulpa de nopal:acetona. Lavado del precipitado obtenido con isopropanol a una relación 1:1 y secado por 48 horas.	9.72%
Orozco <i>et al.</i> (2005)	Molienda de nopal, centrifugado a 10,000 rpm y precipitado con acetona y secado.	2-4 g/L
Del Valle <i>et al.</i> (2005)	Limpiado y cortado de nopal en cubos de 1 cm ³ ; homogeneizado con agua destilada (20% p/v), centrifugado a 4000 rpm/ 1 min, obtención del sobrenadante (mucílago).	No reportado
Sepúlveda <i>et al.</i> (2007)	Molienda del nopal y homogeneizado con agua en relación 1:5 y 1:7 (nopal:agua), filtrado, centrifugado a 3560 rpm/10 min, concentrado del mucílago hasta un tercio de su volumen, extracción a 16 ± 2 °C, maceración de 8 y 16 horas y extracción a 40 ± 2 °C por 4 horas; precipitado con etanol y con isopropanol a una relación 1:3 y 1:4, alcohol:agua, respectivamente; secado a 70 °C.	1.45 (% peso fresco) o 17.88 (% sobre la materia seca)
Abraján-Villaseñor (2008)	Metodologías evaluadas: 1) Molienda, centrifugado 5000 rpm/30 min, precipitado y secado. 2) Pelado, molienda, escaldado a 80 °C/5 min, centrifugado a 5000 rpm/30 min, precipitado y secado. 3) Pelado, molienda, centrifugado, precipitado, decolorado en una solución de hipoclorito de sodio al 12% con agitación suave durante 1 hora y secado. 4) Troceado, cocción a ebullición durante 30 min, centrifugado, precipitado y secado.	Nopal escaldado y decolorado; 0.66%; nopal entero 0.85%; Nopal cocido 0.33% en base fresca.
Ruiz-Hernández (2009)	Troceado del nopal, tratamiento térmico del nopal a 90 °C/10 min, centrifugado a 5000 rpm/10 min, precipitado del sobrenadante obtenido a una relación solución acuosa:etanol 1:4, congelación a -10 °C/24 horas, separación del material insoluble en etanol (mucílago) por centrifugado a 5000 rpm/10 min, secado a 35 °C/48 horas y molienda.	0.435 ± 0.111% en base fresca

Cuadro 3. Metodologías para la extracción del mucílago de nopal (continuación).

Referencia	Método de extracción	Rendimiento
Espino-Díaz <i>et al.</i> (2010)	Molienda del nopal, homogeneizado con agua a una relación 1:1 y hervido a 85 °C/20 min, filtrado, centrifugado 4000 rpm/18 min, precipitado con una solución acuosa de etanol al 65% (v/v) por 20 horas a 4 °C, lavado con etanol (95%) y liofilizado (-12 °C/8 horas).	0.68% en base fresca
Paredes-Martínez (2011)	Nopal con estado de maduración de aprox. 100 días, limpieza y desespinado; troceado en cuadros de 2x2 cm, deshidratado a 50 °C por 10 horas, molienda, preparado de suspensión con nopal deshidratado al 8% de sólidos totales, hidratado por 4 horas, centrifugado a 5000 rpm a una velocidad de alimentación de 200 ml/min, congelación del clarificado obtenido a -5 °C/24 h, precipitado con etanol a una relación 1:2, solución acuosa:etanol, filtrado a vacío y secado a 80 kPa, 40 °C/ 35 min.	150.57 mg/g de nopal.

En los últimos años, el mucílago de nopal ha estado cobrando mayor interés en el área de alimentos, principalmente como agente espesante y emulsionante (Cárdenas *et al.*, 1997; Medina-Torres *et al.*, 2000; Medina-Torres *et al.*, 2003; Sepúlveda *et al.*, 2003; Cárdenas *et al.*, 2008; Garti, 1999). Además, debido a su conformación polimérica y a sus propiedades reológicas (viscosidad) recientemente se ha comenzado a investigar el uso de mucílago de nopal en la elaboración de películas y/o recubrimientos comestibles que puedan ser aplicados a frutas y hortalizas. Del-Valle *et al.* (2005) desarrollaron películas comestibles a base de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) e hicieron su aplicación para aumentar la vida de anaquel de fresa (*Fragaria annanasa*). Arizmendi (2004) elaboró películas comestibles a partir de mucílago de nopal de la especie *Opuntia tormentosa* en donde investigó la optimización en el uso de dos plastificantes en la elaboración de la misma, además de hacer las correspondientes caracterizaciones mecánicas, concluyendo que el glicerol es el compuesto que mejor coadyuva a mejorar las características de dichas películas. Abraján-Villaseñor (2008) elaboró películas comestibles a base de mucílago de nopal evaluando el efecto de la adición de lípidos (ácido oleico y esteárico) en las propiedades de barrera al vapor de agua, mecánicas, ópticas y solubilidad, mostrando que el ácido oleico permite obtener películas con mejores propiedades. También estudió su aplicación como recubrimiento comestible en Jícama mostrando que ayuda a evitar la

pérdida de firmeza de las mismas. Espino-Díaz *et al.* (2010) estudiaron el efecto del pH y el calcio en las propiedades físicas, mecánicas y de barrera en películas comestibles elaboradas a base de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*).

Por lo tanto, es de gran importancia hacer una revisión de las generalidades de las películas y recubrimientos comestibles y así tener un panorama más amplio sobre los componentes necesarios para su elaboración, las propiedades funcionales que presentan y su efecto en la aplicación en frutas y vegetales.

2.2. GENERALIDADES DE PELÍCULAS Y RECUBRIMIENTOS COMESTIBLES

El envasado de alimentos consiste en la conservación y protección de los mismos, particularmente contra el deterioro por oxidación o por crecimiento microbiano, para lograr ampliar su vida de anaquel. En el envasado de alimentos se utilizan diferentes tipos de materiales, como vidrio, plásticos, papel, películas y recubrimientos comestibles, entre otros (Abraján-Villaseñor, 2008). El uso intensivo de materiales sintéticos para el empaqueo de alimentos, ha conllevado a la acumulación de residuos sólidos, ocasionado por su poca o nula biodegradabilidad, transformándose en un problema ecológico serio a nivel mundial (Thanarathan, 2003). Por ello, en los últimos años y con el propósito de reducir el impacto ambiental que se genera con el uso de este tipo de materiales, se ha dado un especial interés en ciertos polímeros naturales (polisacáridos y proteínas principalmente) como compuestos que pueden ser empleados para la obtención de películas o recubrimientos comestibles que ayuden a reducir el deterioro de ciertos alimentos, además de mejorar el manejo mecánico del producto y mantener su integridad estructural (Krochta *et al.*, 1994).

Aunque la aplicación de películas y recubrimientos comestibles en la conservación de alimentos parece reciente, su uso se ha dado desde hace varios siglos. En China desde los siglos XII y XIII se realizaba la inmersión de frutas cítricas en cera para retrasar su deshidratación, más tarde, durante el siglo XVI, en Inglaterra se usó la manteca de cerdo para prolongar la vida útil de productos cárnicos (Baldwin y Hagenmaier, 2012). En el siglo XV una película comestible hecha de Yuba, también conocida como piel de soja o nata de

soja, fue usada en Japón para mantener la calidad en alimentos y mejorar su apariencia (Gennadios y Weller, 1993). En el siglo XIX, se emitió una patente en los Estados Unidos de Norteamérica para conservar diversos productos cárnicos con películas a base de gelatina (Embuscado y Huber, 2009). Desde inicios del siglo XX se han usado cubiertas para prevenir la pérdida de humedad y aumentar el brillo en frutas y vegetales; en los años treinta se hizo disponible el uso de parafinas para recubrir frutos cítricos con el objetivo de retardar la pérdida de humedad. A principios de los 50^s se desarrollaron emulsiones aceite en agua con cera carnauba para recubrir frutas y vegetales frescos (Wardowski *et al.*, 2006).

En los últimos años se han reportado un número considerable de trabajos científicos en donde se estudia el uso de películas y recubrimientos comestibles en la conservación de diferentes productos frescos o procesados. Su producción ha implicado el uso de una gran variedad de materiales biológicos como proteínas, lípidos, polisacáridos, ya sea solos o a partir de la mezcla de los mismos.

2.2.1. Definición de película y recubrimiento comestible

Una película comestible (PC) es una estructura formada por varias capas delgadas y continuas de materiales que pueden ser ingeridos por el ser humano, actúan principalmente como barrera a la transferencia de humedad, O₂, CO₂, aroma y lípidos, son un medio para transportar aditivos (antimicrobianos, antioxidantes, saborizantes, etc.) y ayudan a mejorar las características de manipulación e integridad estructural del alimento (Krochta y De Mulder-Johnston, 1997). Por otro lado, Guilbert *et al.* (1996) mencionan que un recubrimiento comestible (RC) puede ser definido como una capa delgada de material que cubre la superficie del alimento y puede ser consumida como parte de todo el producto, mientras que una PC es una capa delgada preformada, la cual una vez constituida puede ser puesta sobre o entre los componentes del alimento (McHugh, 2000). Los RC son aplicados en forma líquida (usualmente por inmersión) sobre el alimento, mientras que las PC se moldean primero como laminas sólidas que son luego aplicadas en forma de envoltura (Falguera *et al.*, 2011).

Es importantes señalar que la mayoría de las veces las PC y RC son producidos a partir de biopolímeros naturales y de aditivos de grado alimenticio. Estos biopolímeros pueden ser proteínas, lípidos o polisacáridos o una mezcla de dos o más de estos componentes (Han y Gennadios, 2005; Falguera *et al.*, 2011).

Las películas y recubrimientos comestibles deben reunir ciertos requerimientos para poder ser aplicados a los alimentos, entre los que se encuentran los siguientes (McHugh y Krochta, 1994a; Debeaufort *et al.*, 1998):

- Buenas propiedades sensoriales: lo más transparentes, inodoras e incoloras posibles.
- Eficiencia mecánica y gran capacidad de barrera.
- Suficiente estabilidad bioquímica, física y microbiológica.
- Libres de tóxicos y seguros para la salud.
- Una tecnología simple de fabricación y aplicación.
- No contaminantes.
- Bajo costo de la materia prima y del proceso.

Las propiedades funcionales de películas y recubrimientos comestibles dependen de los materiales de los cuales sean fabricados En el siguiente cuadro se mencionan algunas de las más importantes a tomar en cuenta (Biquet y Labuza, 1988; Kester y Fennema, 1986):

Cuadro 4. Propiedades funcionales en películas y recubrimientos comestibles

Reducción de la pérdida y/o absorción de humedad en los alimentos.
Reducción de la transferencia de gases (O ₂ , CO ₂) coadyuvando a controlar la respiración y por tanto regulando los procesos de maduración de ciertos productos o la oxidación de ciertos compuestos contenidos en el alimento.
Reducción de la migración de lípidos: grasas y aceites
Impartición de integridad estructural a los alimentos favoreciendo el manejo de los mismos.
Retención de compuestos volátiles asociados con el sabor.
Pueden ser vehículos para la incorporación de agentes antioxidantes, antimicrobianos, compuestos aromáticos y saborizantes, colorantes, sustancias nutritivas, iones y conservantes.
Ayudan a mejorar ciertas propiedades de apariencia del producto; color, brillo, entre otros
Retardan o previenen el crecimiento microbiano durante el almacenamiento.
Dan protección individual a pequeñas piezas de alimentos: Permitiendo la separación de piezas o dosis específicas contenidas en un mismo envase, facilitando de esta manera su consumo

Fuente: Abraján-Villaseñor (2008); Lin y Zhao (2007); Tharanathan (2003); Debeaufort *et al.* (1998); Avena-Bustillos y Krochta (1993); El Ghaout *et al.* (1991); Rico-Peña y Torres (1991).

Cabe destacar que la característica funcional más importante de las PC y RC para su aplicación en alimentos es el control del contenido de humedad mediante la reducción del intercambio de la misma entre el alimento y el medio circundante evitando cambios perjudiciales a los alimentos, de tal manera que estos exhiban una calidad óptima y seguridad aceptable (Avena-Bustillos y Krochta, 1993; Biquet y Labuza, 1988; Kester y Fennema, 1986). La naturaleza de las PC y RC será de gran importancia, ya que mientras mayor sea la hidrofiliidad del material con el que es elaborada, mayor será su permeabilidad al vapor de agua y el control de humedad será menor. En cambio si el material utilizado es hidrófobo la barrera ante la migración de humedad en el alimento será mayor (Gijón-Arreortúa, 2011).

2.2.2. Componentes principales para la elaboración de películas y recubrimientos comestibles

Los principales componentes de las películas y recubrimientos comestibles pueden clasificarse, básicamente, en tres categorías principales; hidrocoloides (proteínas y polisacáridos), lípidos y mezclas o combinaciones de las dos anteriores (Badlwin y Hagenmaier, 2012; Tharanathan, 2003). Las propiedades de cada PC y RC dependerán del tipo de material con el que estén elaboradas (Badlwin y Hagenmaier, 2012).

2.2.2.1. Polisacáridos

Los polisacáridos son cadenas largas lineales o ramificadas formadas por unidades glucosídicas, aunque también pueden contener unidades de fructano, entre otras. Además poseen grupos hidroxilo por lo que son capaces de formar puentes de hidrógeno con el agua y en consecuencia hidratarse y disolverse total o parcialmente, haciendo que la viscosidad de la fase acuosa aumente o inclusive se dé la formación un gel (Gijón-Arreortúa, 2011). A nivel molecular, los polisacáridos varían de acuerdo a su peso molecular, grado de enlace, conformación y estructura, carga eléctrica e hidrofobicidad. Las variaciones en estas características moleculares llevará a variaciones en la capacidad de diferentes polisacáridos

para formar PC y RC, así como en las diferentes propiedades que estos presenten (Vargas *et al.*, 2008). De manera general, las PC y RC a base de polisacáridos, debido a la naturaleza hidrofílica de los mismos, no tienen buenas propiedades de barrera al vapor de agua, aunque sí a los gases, asimismo pueden adherirse a superficies de frutas y vegetales, además de tener buenas propiedades mecánicas (Kester y Fennema, 1986; Badlwin y Hagenmaier, 2012). Sin embargo, aunque muchas veces no proveen una buena barrera al vapor de agua, estos pueden actuar como agentes “sacrificantes” retardando la pérdida de humedad de productos alimenticios (Kester y Fennema, 1986; Bourtoom, 2008). Dentro de los polisacáridos que han sido probados para ser usados en PC y RC se incluyen derivados de celulosa, almidón y sus derivados, quitosano, carrageninas, pectinas, alginatos y gomas como el agar de algas marinas y el mucílago de nopal, entre otros (Badlwin y Hagenmaier, 2012; Del-Valle *et al.*, 2005; Abraján-Villaseñor, 2008; Espino-Díaz *et al.*, 2010).

2.2.2.2. Proteínas

Las proteínas utilizadas para la formación de películas y recubrimientos son derivadas de diferentes fuentes de animales y plantas, tales como tejidos de animales, leche, huevo, granos y oleaginosas (Vargas *et al.*, 2008; Han y Gennadios, 2005). Las proteínas más comunes para elaborar PC y RC son caseínas, colágeno, gelatina (gretina), proteínas de leche y derivadas de cereales, entre otras. Las PC y RC a base de proteínas proveen una buena barrera a gases como el O₂ y el CO₂, pero no al agua (aunque algunas poseen mayor resistencias al vapor de agua que el resto de los hidrocoloides solubles a este compuesto), tienen una gran susceptibilidad a los cambios de pH y pueden proporcionar un valor nutricional agregado, además de poseer buenas propiedades mecánicas (Baldwin *et al.*, 1995; Badlwin y Hagenmaier, 2012; Tharanathan, 2003).

La gretina o gelatina es una proteína coloidal, soluble en agua e hidrofílica obtenida por hidrólisis parcial del colágeno (proteína insoluble, ampliamente encontrada en la naturaleza como el mayor constituyente de la piel, huesos y tejidos conectivos). A temperaturas por arriba de 40°C, la gretina es soluble en agua formando una solución viscosa que al enfriarse forma geles termorreversibles. Esta proteína tiene un alto contenido de los aminoácidos glicina, prolina e hidroxiprolina. (Pérez-Gago, 2012; Bourtoom, 2008). La gretina ha sido usada como recubrimiento en la industria de alimentos y farmacéutica

desde hace algunos años. Las películas hechas a base de gretina pueden ser una buena barrera a gases y tener buenas propiedades mecánicas, aunque con alta permeabilidad al vapor de agua. Los parámetros principales que afectan la formación de PC y RC a base de gretina son: la fuente de la materia prima, su método de extracción, peso molecular, el método de preparación y grado de hidratación de la película, además de la presencia de plastificantes en su elaboración (Dangaran *et al.*, 2009; Pérez-Gago, 2012).

2.2.2.3. Lípidos

Las PC y RC preparadas con lípidos, debido a su naturaleza hidrofóbica, tienen una baja afinidad al agua lo que les confiere buenas propiedades de barrera al vapor de agua. Además, conforme aumenta la polaridad, ramificación e insaturación en ellos, su permeabilidad a vapor de agua se incrementa. Las películas a base de estos compuestos son relativamente inflexibles, gruesas y con pobres propiedades mecánicas, debido a su naturaleza hidrofóbica, aunque en algunas ocasiones son más brillantes. Asimismo, los lípidos y las ceras tienden a ser más permeables a gases (Badlwin y Hagenmaier, 2012).

Existe una amplia lista de compuestos lipídicos usados para la elaboración de PC y RC, la cual incluye lípidos neutros o triglicéridos, ácidos grasos y resinas, entre otros. Dentro de los compuestos hidrofóbicos más utilizados, se encuentran las ceras de origen animal (de abeja, de grasa de lana y lanolina), vegetal (carnuaba y candelilla, entre otras), sintéticas (ésteres, amidas, etc.) y minerales (Rhim y Shellhammer, 2005; Kester y Fennema, 1986).

Las “ceras” es un término colectivo para sustancias no polares naturales o sintéticas que poseen propiedades como; ser moldeable a temperatura ambiente, quebradizo a sólido, grueso a fino cristalino, traslúcido a opaco, viscosidad relativamente baja, incluso ligeramente por encima del punto de fusión; además de tener una solubilidad y consistencia en función de la temperatura. Químicamente, la cera es un éster de un ácido alifático de cadena larga con una de cadena larga de alcohol alifático. Las ceras tienen una hidrofobicidad alta debido a que no tienen constituyentes polares o bien poseen una parte hidrófila muy pequeña, por lo que no pueden interactuar fácilmente con el agua y en consecuencia son muy eficientes como barreras a la transferencia de vapor de agua (Rhim y Shellhammer, 2005).

2.2.2.4. Mezclas

Las PC y RC pueden producirse a partir de la mezcla de polisacáridos, proteínas y/o lípidos, lo que permite aprovechar las características funcionales distintas de cada compuesto, además de disminuir las desventajas de cada uno (Kester y Fennema, 1986; Vargas *et al.*, 2008). Algunas de las combinaciones que se utilizan son; proteínas y polisacáridos, proteínas y lípidos, carbohidratos y lípidos. Los objetivos principales que se buscan al hacer estas combinaciones son mejorar las propiedades mecánicas y de permeabilidad a gases y/o vapor de agua. Las películas son aplicadas en forma de emulsión, suspensión o dispersión de los constituyentes no miscibles o en capas sucesivas (películas y/o recubrimientos multicapa) en la forma de solución en un solvente común. En recubrimientos compuestos el lípido puede estar emulsionado en la matriz del hidrocoloide, formando lo que se denomina recubrimientos emulsionados o separado de la matriz hidrocoloide formando una doble capa, lo que se denomina recubrimiento bicapa (Navarro-Tarazaga, 2007). El método de aplicación influye de manera considerable en sus propiedades de barrera (Bourtoom, 2008). Este tipo de recubrimientos tiene un potencial importante para ser aplicados en frutas enteras o mínimamente procesados.

2.2.2.5. Aditivos

Además de los componentes principales, existen varios materiales que se pueden incorporar a las PC y RC para ayudar a modificar, principalmente, sus propiedades mecánicas, de barrera, sensorial y su funcionalidad en general.

2.2.2.5.1 Plastificantes

Un plastificante es un compuesto de bajo peso molecular con alto punto de ebullición, el cual agregado a un material polimérico cambia las propiedades mecánicas y físicas de éste, debido a su capacidad para disminuir las fuerzas intermoleculares entre sus cadenas poliméricas, disminuyendo las fuerzas de adhesión y cohesión y la temperatura de transición vítrea, en consecuencia imparten flexibilidad, incrementan la resistencia al corte y disminuyen la fragilidad de las PC (McHugh y Krochta, 1994a). Lo anterior va asociado a un incremento en la permeabilidad de las películas, como consecuencia del aumento en la movilidad de las cadenas del polímero, originando una disminución de la resistencia de las

mismas a la transmisión de gas o del vapor de agua. La influencia en los cambios que pueda generar el plastificante dependerá de su concentración, estructura química, grado de dispersión en la película y grado de interacción con el polímero (Gontard *et al.*, 1993).

Los plastificantes comúnmente utilizados son; mono, di y oligosacáridos (glucosa y miel), polioles (glicerol, sorbitol, manitol, propilenglicol y poli etilenglicol), lípidos y sus derivados; ácidos grasos, mono glicéridos, derivados de éster y surfactantes (McHugh y Krochta, 1994a; Gontard *et al.*, 1993; Avena-Bustillos y McHugh, 2012). Los plastificantes usados en la elaboración de PC deben ser miscibles con el polímero y solubles en el solvente. El sorbitol y el glicerol son plastificantes efectivos, debido a su capacidad para reducir los puentes de hidrógeno internos, mientras incrementan el espaciado intermolecular, lo que origina un descenso en la fragilidad, con el consiguiente aumento en flexibilidad (McHugh y Krochta, 1994b; Gontard *et al.*, 1993). Desafortunadamente, aunque los plastificantes ayudan a aumentar la flexibilidad de las PC, generalmente disminuyen su capacidad para actuar como barrera al transporte de humedad, gases y compuestos aromáticos (Avena-Bustillos y McHugh, 2012).

2.2.2.5.2. Emulsionantes

Los emulsionantes pueden ser considerados como agentes activos de superficie o como agentes estabilizadores. De forma general, son compuestos con una estructura molecular polar y no polar, lo que les permite absorberse en la interfase agua-lípido o agua-aire, reduciendo la tensión superficial. Son esenciales para la formación de PC y RC a base de proteínas y/o polisacáridos que contienen compuestos lipídicos. Su adición permite la dispersión del lípido mejorando la estabilidad de la emulsión e incrementando la distribución de partícula. Por otro lado, los agentes activos de superficie modifican la energía superficial controlando la adherencia y la humectabilidad de la superficie en la aplicación de RC. Entre los más utilizados están; monoesterato de sorbitán y de glicerol, ácido esteárico, estereato de sucrosa, monoesterato de propilenglicol, ácido oleico, mono glicéridos acetilados y, entre los más comunes, Monooleato de Sorbitán Polioxietilénico 80 o Tween 80 (Avena-Bustillos y McHugh, 2012; Han y Gennadios, 2005; Baldwin, 2007).

2.2.2.5.3. Antimicrobianos

La incorporación de compuestos antimicrobianos en PC y RC ofrece una nueva forma de mejorar la seguridad y vida de anaquel de los alimentos, pues ayudan a evitar o reducir el crecimiento de microorganismos en su superficie, en especial de aquellos listos para comer. Algunos de los antimicrobianos más usados comúnmente son los ácidos orgánicos como el ácido benzoico, láctico, sórbico, propiónico, entre otros, los cuales inhiben el crecimiento de células bacterianas y fúngicas; las bacteriocinas (como la nisina y la pediocina) y enzimas como la lizosima. Dentro de los antimicrobianos que en los últimos años se han estado utilizando, principalmente en recubrimientos comestibles en vegetales, se encuentran los aceites esenciales de plantas (Avena-Bustillos y McHugh, 2012; Su Cha y Chinnan, 2004).

Los aceites esenciales son una mezcla de componentes volátiles, producto del metabolismo secundario de las plantas. Son mezclas complejas, compuestas por hidrocarburos como los terpenos, alcoholes, ésteres, aldehídos y compuestos fenólicos, los cuales son los responsables del aroma característico de los mismos. Presentan una importante actividad antibacterial, anti fúngica y antioxidante. Su actividad antimicrobiana, como en el caso del de tomillo (*Thymus vulgari L.*), se asocia al alto contenido de fenoles monoterpenos. Su mecanismo de acción es por su capacidad de interactuar con el citoplasma del patógeno y su modo de acción parece estar relacionada con la solubilidad de cada compuesto. Los aceites esenciales se encuentran en abundancia en el reino vegetal y se pueden localizar en diferentes partes de la planta, ya sea en las hojas (albahaca, mejorana, romero), en la corteza (canela, cedro, sándalo), en las flores (jazmín y rosa), en las cáscaras de algunas frutas como el limón, naranja y mandarina y en frutos como el anís, eneldo e hinojo (Su Cha y Chinnan, 2004; Ramos-García *et al.*, 2010).

2.2.3. Métodos de preparación de películas y recubrimientos comestibles

Las PC pueden ser formadas, esencialmente, por medio de dos técnicas; mediante un proceso “en seco” y uno “húmedo”. El método en seco no usa solventes líquidos como el agua o etanol. En estos procesos se aplica calor a los materiales formadores de la película

para incrementar su temperatura por arriba de su punto de fusión y provocar que fluyan. (Nussinovitch, 2009; Han y Gennadios, 2005).

Los procesos húmedos usan solventes para la dispersión de los materiales formadores de las películas, seguido por un proceso de secado para remover el solvente y formar la estructura de la película. El solvente más comúnmente utilizado en estos casos suele ser agua y en segundo lugar etanol. Todos los materiales o ingredientes que formaran la película son disueltos o dispersos de manera homogénea en los solventes para producir las soluciones o dispersiones formadoras de película. Esta solución o dispersión se esparce en superficies planas (platos, caja de petri, etc.), usando pulverizadores o por vaciado, las cuales posteriormente son puestas a secar para la eliminación del solvente y la formación de la estructura de la película (Guilbert *et al.*, 1996; Han y Gennadios, 2005). Los procesos húmedos son los más utilizados para la formación de PC y para la aplicación de RC.

La formación de PC y RC involucra alguno de los siguientes procesos (Debeaufort *et al.*, 1998; Gontard y Guilbert, 1994; Gorris *et al.*, 1996; Abraján-Villaseñor, 2008):

- Fusión y solidificación de grasas, ceras y resinas.
- Coacervación simple, cuando un hidrocoloide, disperso en soluciones acuosas, es precipitado o gelificado por eliminación del solvente, por la adición de un soluto no electrolítico en el que el polímero no es soluble, por la adición de un electrolito que induzca un efecto de precipitación por salado o por la modificación del pH de la solución.
- Coacervación compleja, cuando dos dispersiones coloidales con cargas diferentes se combinan induciendo interacciones y la precipitación de la mezcla de polímeros.
- Gelatinización térmica o coagulación por calor de la solución macromolecular, que involucra desnaturalización, gelificación, precipitación y enfriamiento rápido de la solución del hidrocoloide, lo que induce una transición sol-gel.
- Remoción por solvente: En el caso de materiales que forman las películas, que son estructuras independientes, se obtienen después de haber sido extendida o pulverizada la solución formadora sobre un soporte, secada y desprendida del mismo. La velocidad y temperatura de secado tiene una influencia importante en las propiedades de la película resultante (Krochta *et al.*, 1994).

Los métodos típicos para la formación de recubrimientos comestibles incluyen aplicación en lecho fluidizado, por pulverización o esparido, extensión de la solución o dispersión formadora del recubrimiento sobre el producto con cepillos o por inmersión del mismo, siendo este último el más común en frutas y vegetales (Dangaran *et al.*, 2009). En este último método, el producto es directamente inmerso en la dispersión formadora del recubrimiento por un tiempo determinado, seguido de una etapa de secado, donde generalmente se utiliza para este propósito aire seco a temperatura ambiente, finalmente se forma una película delgada sobre la superficie del alimento. El método por inmersión se recomienda para alimentos que requieren la aplicación de varias capas del recubrimiento, que tengan superficies irregulares o que requieran un recubrimiento uniforme (Gontard y Guilbert, 1994; Tharanathan, 2003; Dangaran *et al.*, 2009).

2.2.4. Caracterización de las propiedades funcionales de películas y recubrimientos comestibles

Existen varias propiedades que son importantes para el buen funcionamiento o desempeño de las PC y RC, las cuales dependerán, principalmente, del tipo de material usado en su elaboración, el proceso de obtención y el método de aplicación. De las propiedades más importantes y útiles a conocer en las PC se encuentran las propiedades de barrera, mecánicas y físicas, entre otras.

2.2.4.1. Propiedades de barrera

Para caracterizar las propiedades de barrera de las PC y RC, las velocidades de transmisión de ciertos compuesto migrantes pueden ser determinados usando películas independientes. La mayoría de las propiedades de barrera que se estudian incluyen la permeabilidad al vapor de agua, CO₂ y O₂ (Han y Gennadios, 2005). La permeabilidad a gases (O₂ y CO₂) es importante cuando la respiración o reacciones de oxidación pueden afectar la calidad de alimento, por ejemplo en frutas y vegetales frescos y cortados. La permeabilidad al vapor de agua es un factor importante a considerar cuando la frescura de un alimento necesita mantenerse durante el almacenamiento (Lacroix, 2009). Las cubiertas comestibles deben

permitir y/o restringir el intercambio de gases, como el O₂ y el CO₂, además del vapor de agua, conforme esto sea requerido (Baldwin y Hagenmaier, 2012; Gorris *et al.*, 1996).

La permeación, absorción y difusión, son fenómenos típicos de transferencia de masa que ocurren en el sistema de empaquetado de alimentos. La permeación, es la capacidad de ciertos permeantes de penetrar y pasar a través de un material, en respuesta a una diferencia en la presión parcial. Las velocidades de transmisión de vapor de agua y gas, en materiales de empaque, dan una buena indicación de la permeación. Esta propiedad del material puede ser referida como permeancia. Para convertir la permeancia (la cual es dependiente del grosor de la película) a permeabilidad, se multiplica su valor por el grosor de la película. La permeabilidad, puede definirse entonces, de manera general, como la resistencia al flujo de un penetrante o permeante a través de un material resistente (película) impulsado por un gradiente de concentración o presión (Miller y Krochta, 1997; Bósquez-Molina, 2003).

El transporte del permeante puede ocurrir por dos mecanismos; la difusión activada y difusión capilar: La difusión activada se presenta cuando hay ausencia de grietas, poros u otras imperfecciones en la superficie de la película. La sustancia que penetra se disuelve en la matriz de la película del lado de mayor concentración o presión, se difunde a través de la película (impulsada por el gradiente de concentración o presión) y finalmente, se libera o evapora en el lado opuesto de la película. Este proceso consiste, básicamente, en la formación de un espacio entre una serie de segmentos de una cadena de un polímero, debido a oscilaciones de los mismos (un 'estado activo'), seguido por el transporte del permeante dentro de ese hueco antes de que los segmentos regresen a su estado normal. Este tipo de difusión sigue la primera ley de Fick y no depende, primordialmente, de la estructura del sólido. La difusión capilar, en cambio, se presenta en materiales que son porosos o que tienen ciertas imperfecciones o fisuras (Miller y Krochta, 1997; Bósquez-Molina, 2003).

Utilizando una combinación de la primera ley de Fick de difusión y la ley de Henry de solubilidad, se puede expresar matemáticamente la permeabilidad en estado estable de un material que permea a través de una barrera no porosa y sin imperfecciones significativas.

La primera ley de Fick establece que el flujo del permeado, J , es dependiente del coeficiente de difusión, D , de la diferencia de concentración (dC) y del espesor (dX), expresado mediante la siguiente ecuación (Miller y Krochta, 1997; Lobo, 1997; Bósquez-Molina, 2003):

$$J = -D \frac{dC}{dX} \quad (1)$$

En donde el coeficiente de difusión describe el movimiento de moléculas de permeante a través de un polímero y representa una propiedad cinética del sistema polímero-permeante. Y el signo negativo indica que la migración se lleva a cabo en dirección de la menor concentración.

Por otro lado, la ley de solubilidad de Henry, indica que la concentración del permeado (C) en la película es igual al producto del coeficiente de solubilidad, S , y la presión parcial del permeado en el aire adyacente, p :

$$C = Sp$$

El coeficiente de solubilidad describe la disolución de un permeante en un polímero. Además, está en función de la temperatura y puede ser una función de la presión de vapor (o concentración del permeante disuelto). Cuando S es independiente de la concentración y presión de vapor del permeante sorbido (por ejemplo a concentraciones muy bajas de permeante), entonces la relación entre C y P se vuelve lineal y S se refiere como el coeficiente de solubilidad de la Ley de Henry.

Entonces, la combinación de la ley de Fick con la ley de Henry, queda de la siguiente manera:

$$J = -DS * \frac{dp}{dX} \quad (2)$$

Siendo dp el diferencial de las presiones parciales a través de la película y DS la permeabilidad o el coeficiente de permeabilidad (P).

Por lo tanto;

$$DS = -J * \frac{dX}{dp} = \text{Permeabilidad } (P) \quad (3)$$

Siendo D y S independientes de la concentración.

En el equilibrio, la permeabilidad está definida con D y S constantes, integrando y combinando la ecuación (1) con las ecuaciones (2) y (3) se obtiene:

$$P = \frac{dM/dt_{\text{edo estacionario}} * L}{A * \Delta p}$$

Donde; M es la cantidad de permeante (que se expresa en masa o volumen), t es tiempo, L y A son el espesor y área transversal de la película, respectivamente, Δp es la diferencia de la presión parcial a través del película, y P es el coeficiente de permeabilidad. El término (dM/dt) es la pendiente de la curva de transmisión y se requiere que se determine en el equilibrio para calcular el coeficiente de permeabilidad.

Experimentalmente, la permeabilidad puede determinarse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Permeabilidad} = \frac{w * L}{A * t * (p_1 - p_2)}$$

Es decir;

$$\text{Permeabilidad} = \frac{\text{masa del material penetrante} * \text{espesor}}{\text{área} * \text{tiempo} * \text{diferencia de la presión parcial}}$$

$$[=] \frac{g * mm}{m^2 * d * kPa}$$

2.2.4.2. Propiedades mecánicas

Una PC con buenas propiedades de barrera puede ser ineficiente si sus propiedades mecánicas no permiten mantener su integridad durante los procesos de manejo, empaclado y transporte. Por lo tanto, es importante la determinación de estas propiedades. Existen pruebas mecánicas realizadas en películas sintéticas, las cuales son aplicadas a las PC.

Estas pruebas incluyen, el esfuerzo de tensión, compresión y/o punción, el módulo elástico, entre otros (Han y Gennadios, 2005). Las películas comestibles deben ser resistentes a la fractura y abrasión, además de ser flexibles. Las propiedades mecánicas de PC dependen, principalmente, del tipo de material utilizado en su formación y, especialmente, de su cohesión estructural para formar enlaces fuertes y numerosos entre las cadenas poliméricas y así, disminuir su separación y aumentar su cohesividad (Gorris *et al.*, 1996).

El comportamiento mecánico de un material refleja la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material a su deformación. El método más común para determinar propiedades mecánicas en un material es controlar la deformación del mismo, bajo la acción de una fuerza determinada. Existen varios aparatos para medir las propiedades mecánicas, entre los que se encuentran el texturómetro y la máquina universal de ensayos mecánicos (Debeaufort *et al.*, 1998; Zaldo *et al.*, 1993).

En la siguiente figura se muestra una señal característica obtenida del equipo de pruebas mecánicas SINTECH 1/s, en donde se observa las principales zonas de la curva, así como la fuerza y el tiempo que se registran durante la evaluación de una película sometida a punción o extensión.

En la zona de deformación elástica inicial se observa una región lineal, lo que indica una relación proporcional entre el esfuerzo y la deformación. En esta zona el material se comporta según la ley de Hooke y la película exhibe un comportamiento elástico. Una vez superado el punto límite de proporcionalidad, aunque la película presenta aun elasticidad, ya no obedece la ley de Hooke, pues su deformación es no lineal hasta un límite elástico: este caso corresponde a la zona donde se observa el comportamiento de la película durante la punción o tracción. Si el material fuera perfectamente elástico, y la fuerza aplicada sobre él se suspendiera en esta zona, recuperaría su forma inicial, no obstante, gran parte de los materiales solo llegan a recuperar parcialmente su forma original. Finalmente, el punto máximo corresponde a la ruptura inicial de la película y la pendiente a la ruptura subsecuente (Gijón-Arreortúa, 2011).

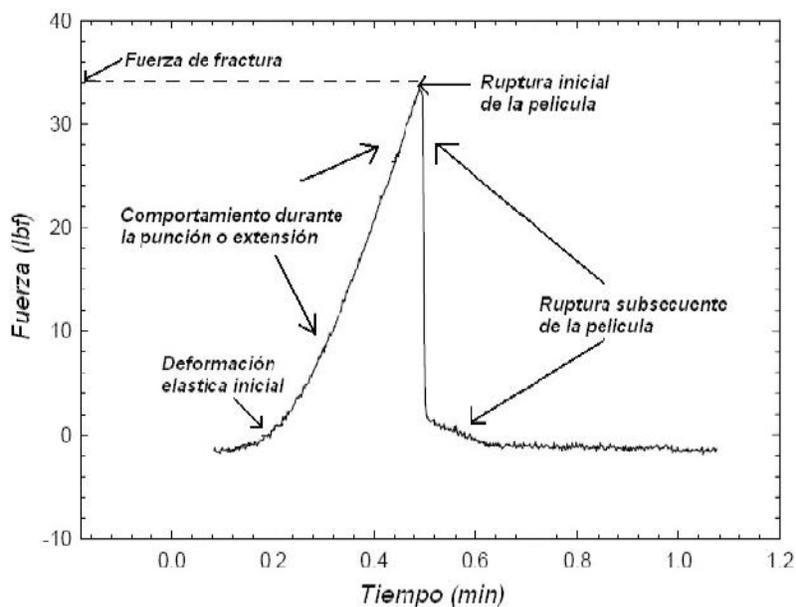


Figura 4. Señal obtenida de un equipo de pruebas SINTECH 1/s durante la punción o extensión de una película.

Fuente: Gijón-Arreortúa (2011).

2.2.5. Efectos fisiológicos en frutos

Las frutas frescas están constituidas con aproximadamente un 75-90% de agua, además de incluir carbohidratos, minerales, ácidos, compuestos aromáticos, pigmentos y vitaminas. La extensión de la vida de anaquel de frutas frescas puede llevarse a cabo aplicando sobre su superficie cubiertas comestibles, las cuales son semipermeables al vapor de agua y a gases, además de que ayudan a mejorar el manejo mecánico de las mismas (Nussinovitch, 2009). Como resultado de la aplicación de RC, el intercambio de gases entre el fruto y el ambiente se modifica. Por lo tanto, la permeabilidad al O_2 y al CO_2 cambia, llegando a convertirse el producto recubierto en un empaque individual con atmósfera modificada. Con la respiración del fruto se presenta una reducción en la cantidad de O_2 presente, junto con el incremento de CO_2 debido a la aplicación del RC. Por ello, debe tomarse en cuenta que si los niveles de O_2 llegan a ser demasiado bajos se pueden presentar reacciones anaeróbicas, dando lugar a sabores y olores extraños, además de maduración anormal o senescencia acelerada. Asimismo, en su aplicación en frutos climatéricos se presenta una disminución de la velocidad de respiración y de la producción de etileno, además de una maduración más lenta y por consiguiente un aumento en su vida de anaquel. Por lo tanto, la aplicación

de RC en frutos se da, principalmente, para controlar su madurez, reducir la penetración de oxígeno e incrementar la salida de dióxido de carbono y etileno, además de reducir la pérdida de agua (Nussinovitch, 2009; Kays y Paull, 2004; Debeaufort *et al.*, 1998).

Debido a que los RC forman una barrera sobre la superficie del fruto, pueden ayudar a disminuir las velocidades de transmisión de vapor de agua entre el medio y el fruto, lo cual contribuye a conservar su firmeza y a disminuir la pérdida de turgencia. Asimismo, es importante mencionar que en algunos casos, debido al incremento de CO₂ y disminución de O₂ internos en el fruto como resultado de la aplicación de RC, se puede contribuir a retrasar el reblandecimiento del producto (Bai y Plotto, 2012; Olivas y Barbosa-Canovas, 2009; Kader, 1986).

Por otro lado, el color es considerado uno de los factores externos más importante en la calidad de frutos y vegetales, ya que influye enormemente en la elección de los consumidores. Se ha mostrado que algunas cubiertas comestibles contribuyen a mantener el color en frutos, suprimiendo la aparición de colores indeseables, debido a la formación de atmósferas modificadas en los mismos (Bai y Plotto, 2012).

El daño por infección en poscosecha es, probablemente, la mayor causa de pérdida de frutos frescos, pues estos pueden llegar a ser infectados por diferentes microorganismos que se propagan por suelo, aire y agua, los cuales pueden penetrarse en la piel del fruto aprovechando una lesión existente en su epidermis causando diferentes enfermedades (por ejemplo, la pudrición ocasionada por el hongo *Botrytis cinerea*), acelerando su deterioro y descomposición. Los RC pueden formar una barrera contra este tipo de infecciones, reduciendo la incidencia de enfermedades pos-cosecha. Además, el uso de la sanitización, seguida de la aplicación de RC con antimicrobianos en su formulación, puede disminuir la carga microbiológica en la superficie del fruto y protegerlo contra la infección microbiana (Rojas-Grau *et al.*, 2006; Pao *et al.*, 1999).

Otro de los atributos importantes en los frutos es el sabor, el cual puede ser modificado o conservado con el uso de RC debido a que pueden influir de dos formas: funcionando como una barrera a aromas volátiles, contribuyendo a la acumulación de estos compuestos en el fruto o alterando el metabolismo del producto retardando su maduración y deterioro y

extendiendo el sabor de los mismos. Por otro lado, al cambiar la atmósfera interna en los frutos (aumento y disminución excesiva de CO₂ y O₂, respectivamente) se puede presentar fermentación, acumulación anormal de etanol, etilacetato y otros componentes volátiles y en consecuencia la aparición de sabores extraños (Olivas y Barbosa-Canovas, 2009; Baldwin, 1994).

Los desórdenes fisiológicos en la pos-cosecha de frutos son causados por factores no patológicos tales como, temperatura, humedad y combinación de gases inadecuados, los cuales afectan el funcionamiento del sistema del fruto. Los síntomas de desórdenes fisiológicos pueden aparecer como quemaduras, harinosidad, escaldadura superficial, daños por frío, etc. (Bai y Plotto, 2012). El uso de cubiertas comestibles puede contribuir a disminuir estos desórdenes fisiológicos (Navarro-Tarazaga *et al.*, 2011), aunque en algunos casos aumenta la presencia de los mismos (Jin-Park, 1999).

2.3. GENERALIDADES DE LA CIRUELA

La inmensa variedad de ciruelas, su distribución a través de amplias áreas, su adaptabilidad a varias condiciones ambientales y su gran contribución a la nutrición humana debido a su aporte nutricional la hace no sólo de gran importancia en el presente sino también en el futuro alimentario (Usenik *et al.*, 2008). El aporte nutrimental de este fruto es considerable cuando es consumido en fresco, pues además de su baja cantidad de grasas y a ser una buena fuente de fibra dietética, aporta una amplia variedad de vitaminas como la A, B-6, C, E, K, tiamina, riboflavina, niacina, ácido pantoténico, además de algunos minerales como el calcio, magnesio, fósforo y potasio (Hui, 2006). Asimismo, se ha reportado que la ciruela tiene un alto contenido de fitoquímicos (los cuales funcionan como antioxidantes naturales que ayudan a reducir los riesgos de cáncer) y que el consumo de este fruto reduce el riesgo de hipertensión y otras enfermedades crónicas (Crisosto *et al.*, 2002; Díaz-Mula *et al.*, 2011; Usenik *et al.*, 2008; Ames *et al.*, 1995).

Las principales variedades de ciruela del género *Prunus* están generalmente divididas en tres grupos, con la Europea y Japonesa como principales especies comerciales para su consumo en fresco. El origen de la ciruela europea (*Prunus domestica*) fue en el Oeste de

Europa o en el Este de Asia, alrededor del Cáucaso o el mar Caspio. Por otro lado, la ciruela Japonesa (*Prunus salicina*) es nativa de China, aunque es Japón el país en donde fue domesticada hace 400 años (Crisosto *et al.*, 1999; Hui, 2006; Hansmann y Combrink, 2003). Aunque en América ya existían algunas especies de ciruela, como la *Prunus americana* y *Prunus Hortulana*, su cultivo no se extendió amplia y comercialmente. Por ello, se plantea que la introducción de ciruela (*P. domestica* y *salicina*) en el continente americano desde Europa se dio en tiempos de la colonia, en huertos de haciendas y misiones, en los Estados Unidos de Norteamérica desde donde su cultivo se extendió a nuestro país (Hansmann y Combrink, 2003; ASERCA, 2002).

2.3.1. Clasificación Botánica

El ciruelo es el nombre común para el árbol de muchas especies pertenecientes al género *Prunus* de la familia de las rosáceas. En el cuadro 5 se muestra la clasificación taxonómica de la ciruela.

Cuadro 5. Clasificación Taxonómica de la ciruela

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Rosales
Familia	Rosaceae
Género	<i>Prunus</i>
Especie	<i>Prunus domestica</i> L.; <i>Prunus salicina</i> L.
Nombre común	Ciruela

Fuente: Paliyath y Murr (2008); Thompson (2003); Cano-Cano y Marroquín (1994); Benson (1962).

2.3.2. Importancia Económica

En México, la superficie cosechada de ciruela para el año 2011 fue de 14,972.05 hectáreas con una producción total de 70,676.90 toneladas, siendo Michoacán, Chiapas, Jalisco y

Puebla los principales estados que aportaron la mayor producción a nivel nacional, figura 5 (SIAP, 2013).

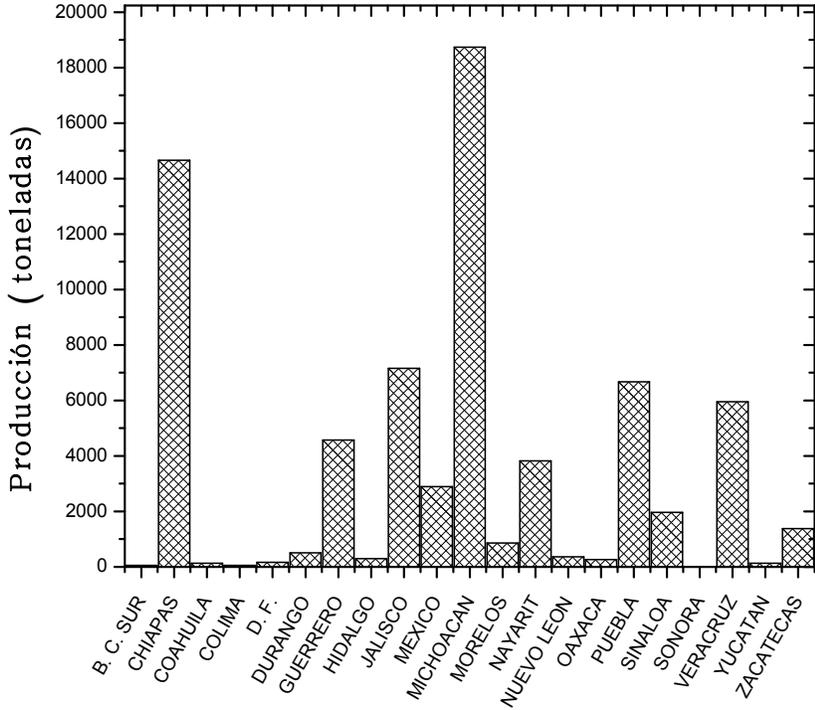


Figura 5. Producción nacional de ciruela reportada por estados según el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (2013).

México importa ciruela, principalmente de EE.UU. y Chile. Tan sólo en el año 2000 el volumen de importación de este fruto fue de 9,857 toneladas (valuado en 11.8 millones de dólares) y el de exportación de 592.72 toneladas (valuado en 682.44 mil dólares) con un consumo a nivel nacional de 89,152.50 toneladas, cifras que nos permiten deducir que el consumo de ciruela en nuestro país es de gran relevancia (ASERCA, 2002; SIAP, 2013). Por otro lado, el precio que se paga al productor depende muchas veces de la fecha de cosecha de la ciruela y de su entrada al mercado, pues la mayoría de las veces existe una gran diferencia de precios entre las cosechas tempranas, normales y tardías. De acuerdo a la información proporcionada por el SIAP (2013), en el 2011 el precio medio rural por tonelada de ciruela fue de \$4,820.45 pesos.

2.3.3. Fisiología y cambios durante la maduración

La ciruela es una fruta succulenta, llamada drupa y es clasificada en base a su fisiología de maduración como climatérica (Thompson, 2003), aunque Abdi *et al.* (1997) reportaron que la tasa de producción de etileno es muy diferente en algunas variedades, concluyendo que existen dos patrones de maduración; climatérico (se da un incremento en la producción de etileno relacionado con el inicio de la maduración) y climatérico suprimido (se producen pequeñas cantidades de etileno durante las últimas etapas del proceso de maduración). El etileno es un hidrocarburo gaseoso producido por la mayoría de los tejidos vegetales en los que actúa como regulador del crecimiento. En frutos climatéricos es la hormona responsable de iniciar y coordinar los principales cambios que se producen durante la maduración de los mismos (Candan, 2010; Payasi y Sanwal, 2010).

La piel (epicarpio) de las ciruelas consiste en una capa de células vivas alargadas (epidermis) cubierta por una fina capa de cutina (cutícula). Protege su tejido subyacente y permite el intercambio de metabolitos y gases con el ambiente externo a través de aberturas llamadas lenticelas. La cera depositada sobre la cutícula le da a la piel un color mate y la hace impermeable al agua. La parte carnosa y comestible (mesocarpio) se compone de células del parénquima que tienen un protoplasto activo donde ocurren todas las reacciones metabólicas. El protoplasto está rodeado por una pared celular pectínica. La semilla de este fruto está cubierta por una estructura dura (endocarpio) que consiste en células isodiamétricas con paredes celulares gruesas y lignificadas (esclerénquima). Usualmente, el mesocarpio está pegado al endocarpio, aunque en algunas variedades esto no es así (Hansmann y Combrink, 2003).

Dentro del género *Prunus* se encuentran diferentes especies denominadas conjuntamente frutas de hueso o frutas de carozo entre las que se encuentran *P. domestica* L. (ciruela europea) y *P. salicina* L. (ciruela japonesa) con diversidad de variedades de cada una de ellas: La ciruela japonesa es grande, redonda o en forma de corazón con o sin un ápice en forma prominente. El color de la pulpa y piel de una fruta madura puede variar de amarillo a rojo sangre. Para los que tienen la piel de color rojo, esta cambia durante la maduración de verde a rojo y usualmente comienza en el ápice. La textura de la fruta varía de firme a suave y endebles. Las ciruelas europeas usualmente son ovaladas, con una protrusión o

abultamiento en la parte central, y comprimidas bilateralmente. Su color de piel es, generalmente, azul y púrpura y tienen una pulpa gruesa, carnosa, jugosa que se puede separar fácilmente del hueso. Su textura es firme y semi endeble (Hansmann y Combrink, 2003).

Existen muchos cambios biológicos del fruto antes de su cosecha, mientras permanece en el árbol. Las sustancias sintetizadas en las hojas del fruto a través de la fotosíntesis son trasladadas al fruto y transformadas en productos que al final determinan la calidad y valor nutricional del mismo. El contenido de sólidos totales se incrementa en el periodo de crecimiento o desarrollo. Los ácidos orgánicos se acumulan durante las primeras etapas de crecimiento y van disminuyendo gradualmente. El contenido de compuestos fenólicos de la fruta es alto en etapas tempranas del crecimiento, después disminuye y finalmente permanece constante hasta la cosecha. Los compuestos volátiles, los cuales determinan el aroma y sabor del fruto, se producen durante esta etapa al igual que la cera que se desarrolla en la piel de la fruta. Muchas veces las frutas alcanzan un gran tamaño aun sin estar maduras o listas para cosechar (Hansmann y Combrink, 2003).

Durante la maduración las sustancias pécticas en las paredes celulares cambian de una forma insoluble a una soluble, resultando en el reblandecimiento o pérdida de firmeza del fruto. El contenido de sólidos solubles y la concentración de azúcares aumentan, mientras que la de ácidos totales disminuye. El contenido de clorofila (pigmento verde) disminuye en la piel, mientras que el contenido de carotenoides (pigmentos amarillos) y antocianinas (pigmentos rojos) se incrementa. Por otro lado, la tasa de respiración de la ciruela es alta durante e inmediatamente después de la división celular, disminuye a un mínimo pre climatérico conforme alcanza su madurez y se incrementa posteriormente de manera irreversible a un máximo (climaterio) durante la maduración. En el climaterio, las frutas son suaves y dulces con un sabor y olor característicos y de aceptación al consumidor. Finalmente, la senescencia se establece, después de lo cual la tasa de respiración disminuye y las frutas llegan a sobre madurarse y descomponerse (Hansmann y Combrink, 2003; Usenik *et al.*, 2008).

2.3.4. Principales pérdidas pos-cosecha

Las ciruelas son frutos climatéricos y altamente perecederos que sufren un deterioro rápido, reflejado en su reblandecimiento o pérdida de firmeza, pérdida de agua y putrefacción. Las condiciones de almacenamiento comercial (-0.5-1 °C y 85-95% de humedad relativa) pueden retrasar el proceso de reblandecimiento, aunque podrían provocar el desarrollo de desórdenes fisiológicos. Muchos de estos desórdenes son; oscurecimiento de la pulpa o pardeamiento, pérdida de jugosidad por harinosidad, transparencia en la pulpa o “*gel breakdown*”, acumulación de pigmento o aparición de tintes rojos en la pulpa (*bleeding*), sobre maduración y pérdida de color y sabor. Estos desórdenes muchas veces son mencionados como daños por frío y no son detectados en los frutos hasta que estos son removidos del almacén y puestos a temperaturas de comercialización o temperatura ambiente (Crisosto *et al.*, 1999; Crisosto *et al.*, 2002; Yahia, 2009; Hui, 2006; Candan *et al.*, 2008; Eum *et al.*, 2009).

Una de las enfermedades más comunes que se presentan en este fruto es la pudrición parda, causada por el hongo *Monilia fructicola*, que es la enfermedad de pos-cosecha más importante de las frutas de carozo. Esta infección comienza durante la floración y la pudrición se puede dar antes de la cosecha, aunque muchas veces se da en la pos-cosecha. Entre sus estrategias de control está la limpieza del huerto para minimizar fuentes de infección, la aplicación de fungicida en precosecha, y el enfriamiento inmediato de la fruta tras la cosecha. Además, se puede utilizar un tratamiento en la pos-cosecha a base de fungicida. Otra de las enfermedades importantes es la de moho gris, causado por el hongo *Botrytis cinerea*, la cual puede ser un problema grave en condiciones de clima húmedo. Este padecimiento se puede dar durante el almacenamiento si se ha contaminado la fruta en la cosecha o por heridas en el manejo del producto. Muchas de las medidas efectivas para su control consisten en evitar daños mecánicos y en un buen manejo de la temperatura (Goncalves *et al.*, 2010; Yahia, 2009; Crisosto *et al.*, 2002; Barkai-Golan, 2001; Hansmann y Combrink, 2003).

La vida de anaquel de la fruta fresca varía entre cultivares y puede ser de 1 a 8 semanas, dependiendo de la temperatura de almacenamiento. Se ha visto que la vida máxima de

anaquel se obtiene cuando la temperatura es cercana a 0°C y la mínima cuando se almacena a alrededor de 5°C (Pérez-Gago *et al.*, 2003).

2.3.5. Tratamiento pos-cosecha para la conservación de ciruela

En los últimos años y debido a la demanda de productos frescos que contribuyan a incrementar los beneficios en la salud, se ha incrementado el consumo de ciruela en fresco, a tal punto que alrededor de la mitad de la producción se destina para este rubro.

Existen varios métodos químicos y físicos que se han utilizado para mantener la calidad pos-cosecha de ciruela fresca durante su almacenamiento y comercialización, entre los que se incluyen la aplicación de 1-metilciclopropano o calcio, almacenamiento a bajas temperaturas, diferentes tratamientos térmicos, aplicación de atmósferas controladas, dióxido de cloro combinado con tratamiento ultrasónico, entre otros (Chen y Zhu, 2011; Larrigaudière *et al.*, 2009; Luo *et al.*, 2009; Menniti *et al.*, 2006; Serrano *et al.*, 2004).

En el caso del uso de atmósferas modificadas (AM), atmósferas controladas (AC) y AC en combinación con temperaturas cercanas a 0 °C, se obtiene una mejora en la vida pos-cosecha del fruto. Los mayores beneficios en el almacenamiento con AC son retención de firmeza y color del fruto. Aunque no se ha reducido la incidencia de pudrición por el uso de AC con una composición de 1-2% O₂ + 3-5 %CO₂. Por otro lado, se sugieren un 6% de O₂ y 17% CO₂ como condiciones para la reducción de daño interno de la fruta, aunque la efectividad dependerá del cultivar, factores pre cosecha y tiempo de almacenamiento (Pérez-Gago *et al.*, 2003; Crisosto *et al.*, 2002; Crisosto *et al.*, 1999).

Finalmente, la aplicación de RC en algunos cultivares de ciruela han mostrado una mejora en la vida y calidad pos-cosecha de la misma (Cuadro 6), siendo un factor muy importante la composición de estos recubrimientos, los cuales en su mayoría contienen algún tipo de cera y/o carbohidrato y/o proteína (Navarro-Tarazaga, *et al.*, 2011; Navarro-Tarazaga *et al.*, 2008; Reinoso *et al.*, 2008; Pérez-Gago *et al.*, 2003).

Cuadro 6. Recubrimientos comestibles aplicados en ciruela.

Tipo de recubrimiento	Condiciones	Efecto	Referencias
Alginato (1 y 3%)	35 días/2 °C y 90% H.R. + 3 días/20 °C y 65% H.R.	Disminución en producción de etileno. Retraso en pérdida de peso, acidez, ablandamiento, y cambios de color, menor acumulación de antocianinas y carotenoides y aumento de dos semanas de almacenamiento en ciruelas “Larry Ann” y “Sungold” y de tres en “Blackamber” y “Golden Globe”.	Valero <i>et al.</i> (2013)
HPMC-Cera de abeja (0, 20, 40 y 60 g/100 g en b.s.)	4 semanas/1 °C + 1-3 semanas/20 °C	Reducción en pérdida de peso, reblandecimiento y “bleeding”. Mayor efectividad a menor contenido de cera de abeja.	Navarro-Tarazaga <i>et al.</i> (2011)
Versasheen con y sin 0.2% (p/v) de sorbitol.	8 días/20 °C/85% H.R.	Disminución en incremento de pH y pérdida de firmeza, acidez y luminosidad. La incorporación de sorbitol disminuyó la pérdida de peso, el intercambio de CO ₂ y etileno, aumentando la vida útil de ciruelas “Sapphire”.	Eum <i>et al.</i> (2009)
HPMC-Cera de Abeja (20 y 40% b.s.) + glicerol y manitol (en proporciones plastificante/HPMC de 100:1 y 300:1)	8 semanas/1 °C/85 ± 5% H.R. + 1 semana/5 °C/85 ± 5% H.R. + 1-2 semanas 20 °C/90 ± 5% H.R.	Reducción del ablandamiento y el “bleeding en ciruelas “Angeleno”, aumentando la vida útil de las mismas, sin disminuir la pérdida de peso. Un bajo contenido de plastificante disminuyó la pérdida de textura. Un bajo contenido de cera de abeja redujo el “bleeding”.	Navarro-Tarazaga <i>et al.</i> (2008)
Proteína de suero con y sin aceite de girasol mezclado con cera de abeja al 5 y 10% (p/p)	15 días/5 °C	Disminución de la pérdida de peso, firmeza y mayor aceptación sensorial a alto contenido lipídico, aumentando la vida útil de ciruelas (<i>Prunus domestica</i> L.)	Reinoso <i>et al.</i> (2008)
HPMC-Cera de abeja y ácidos grasos (esteárico, palmítico y oleico en proporción cera de abeja/ácido graso de 2:1 y 5:1)	Ciruela “Angeleno”: 2, 4, 6 y 8 semanas/1 °C + 1 semana/5 °C + 5 días/20 °C. Ciruela “Sungold”: 1, 2, 3 y 4 semanas/1 °C o 5 °C + 1 día/20 °C	Mayor retención de firmeza y menor incidencia de bleeding en ciruelas “Angeleno”. Ningún efecto del tipo y contenido de ácido graso de la formulación en el CO ₂ interno, firmeza y desórdenes fisiológicos. Disminución en el cambio de coloración en la piel y reducción en la incidencia de daños por frío, sin la retención de la firmeza en ciruelas “Sungold”.	Navarro-Tarazaga <i>et al.</i> (2007)
HPMC-Lípido (cera de abeja o goma laca en dos niveles: 20 y 60% en base seca)	4, 5 y 6 semanas/1 °C/85% H.R. + 3 días/6 °C + 1, 20 o 25 días/20 °C	Disminución en pérdida de peso en ciruelas “Autumn Giant” conforme el contenido de lípido aumentó. Sin ningún efecto en la textura después de un periodo corto de almacenamiento a 20 °C. Para periodos prolongados de almacenamiento a 20 °C; reducción de pérdida de textura y desórdenes fisiológico, mejorando la calidad de las frutas.	Pérez-Gago <i>et al.</i> (2003)

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Elaborar películas comestibles a base de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) variedad “Milpa Alta” con un componente proteínico (gernetina) y uno lipídico (cera de abeja) en mezclas de dos y tres componentes con concentraciones variables; así como caracterizar sus propiedades físicas, de barrera, mecánicas y estructura microscópica para seleccionar la formulación más apropiada y aplicarla como recubrimiento comestible en ciruela (*Prunus salicina* L.) para su conservación en fresco.

3.2 Objetivos particulares

1) Elaborar películas comestibles modelo a base de mucílago de nopal con un componente proteínico (gernetina) y uno lipídico (cera de abeja) en mezclas de dos y tres componentes con concentraciones variables para su caracterización mediante sus propiedades físicas (espesor, transparencia y color), de barrera (permeabilidad al vapor de agua y a gases de CO₂ y O₂), mecánicas (esfuerzo de tensión y punción) y estructura microscópica que permita la selección de la formulación más adecuada para su aplicación como recubrimiento comestible.

2) Evaluar el efecto de la aplicación de la formulación seleccionada como recubrimiento comestible en los parámetros de calidad (pérdida de peso, sólidos solubles, acidez, pH, color y firmeza) y fisiológicos (daño por frío y respiración) de ciruela (*Prunus salicina* L.) durante su almacenamiento en refrigeración.

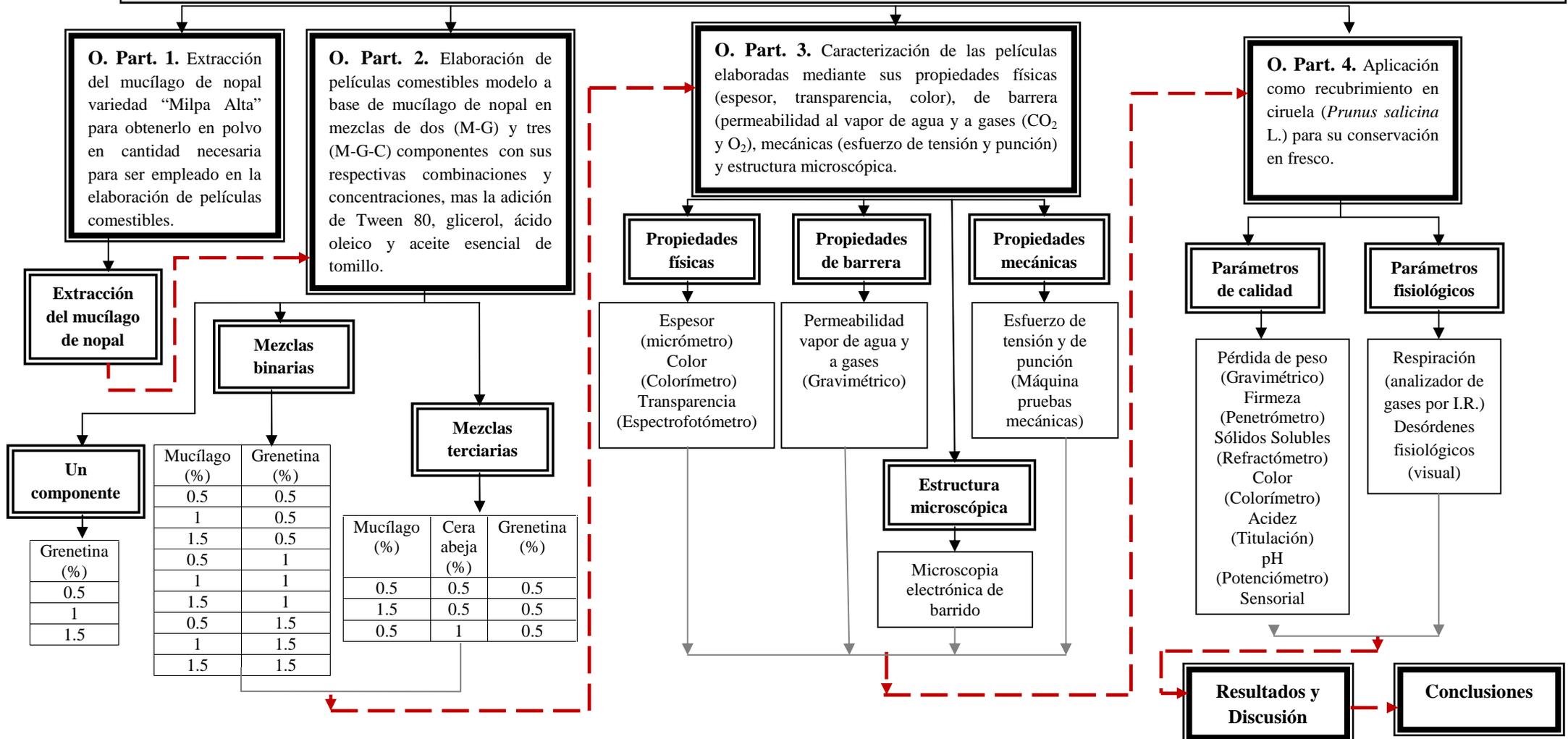
4. HIPÓTESIS

La aplicación de películas y/o recubrimientos comestibles a base de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) variedad “Milpa Alta”, grenetina y cera de abeja; con las propiedades físicas, de barrera y mecánicas adecuadas; en ciruela (*Prunus salicina* L.) puede extender su vida de anaquel, disminuyendo su velocidad de maduración, así como conservar sus propiedades de calidad como fruta fresca

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. CUADRO METODOLÓGICO

OBJETIVO GENERAL: Desarrollar películas comestibles a base de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) variedad “Milpa Alta” (M) con un componente proteínico (grenetina; G) y uno lipídico (cera de abeja; C) en mezclas de dos (M-G) y tres componentes (M-G-C) con concentraciones variables; así como caracterizar sus propiedades físicas, de barrera, mecánicas y estructura microscópica para seleccionar la formulación más apropiada y aplicarla como recubrimiento comestible en ciruela (*Prunus salicina* L.) para su conservación en fresco.



5.2. Elaboración y caracterización de películas comestibles

5.2.1. Material biológico para la obtención de mucílago de nopal

Los cladodios de nopal de la variedad ‘Milpa Alta’ se obtuvieron en el municipio de Milpa Alta a través de NOPALPLUS, Grupo Agroempresario. Los nopales fueron seleccionados de acuerdo al peso (210-280 g) y longitud (25 cm aprox.) que corresponde al estadio de maduración temprana de 50 días aproximadamente.

5.2.2. Extracción de mucílago de nopal y su obtención en polvo

La extracción de mucílago de nopal se llevó a cabo con la metodología usada por Paredes-Martínez (2011) con algunas modificaciones. Los cladodios se lavaron, cepillaron, escurrieron, desespinaron con ayuda de un instrumento punzocortante de acero inoxidable (sacabocado), teniendo cuidado de no cortar exceso de pulpa. La corona del nopal se retiró y se cortaron cuadros homogéneos de 2x2 cm. Los nopales se molieron en una licuadora (Marca Osterizer), sin la adición de agua, hasta que la pulpa quedó completamente homogénea. El nopal molido se centrifugó a una velocidad de alimentación de 200 mL/min y una velocidad de giro de 5000 rpm en una centrifuga (Marca Didacta Italia, Modelo TAG1/d). Durante el centrifugado se obtuvo el clarificado o fase ligera; al cual posteriormente se le adicionó etanol desnaturalizado con grado de pureza del 96% con una relación mucílago-etanol 1:2. La mezcla se dejó reposar durante 12 horas en refrigeración. Posteriormente se eliminó la cantidad de agua-alcohol de la muestra sólida o sobrenadante y se filtró a vacío a 30 mmHg por 5 minutos, para eliminar el exceso de agua y alcohol. El mucílago se separó y se colocó en charolas para su secado a 40 °C en una estufa (AFModel 40 Lab Oven), durante 24 h hasta llegar a una humedad del 4% y el producto se pesó en una balanza analítica para evaluar la cantidad de miligramos de producto deshidratado y obtener el rendimiento correspondiente. El mucílago seco se almacenó a temperatura ambiente en un recipiente herméticamente cerrado (Figura 6).

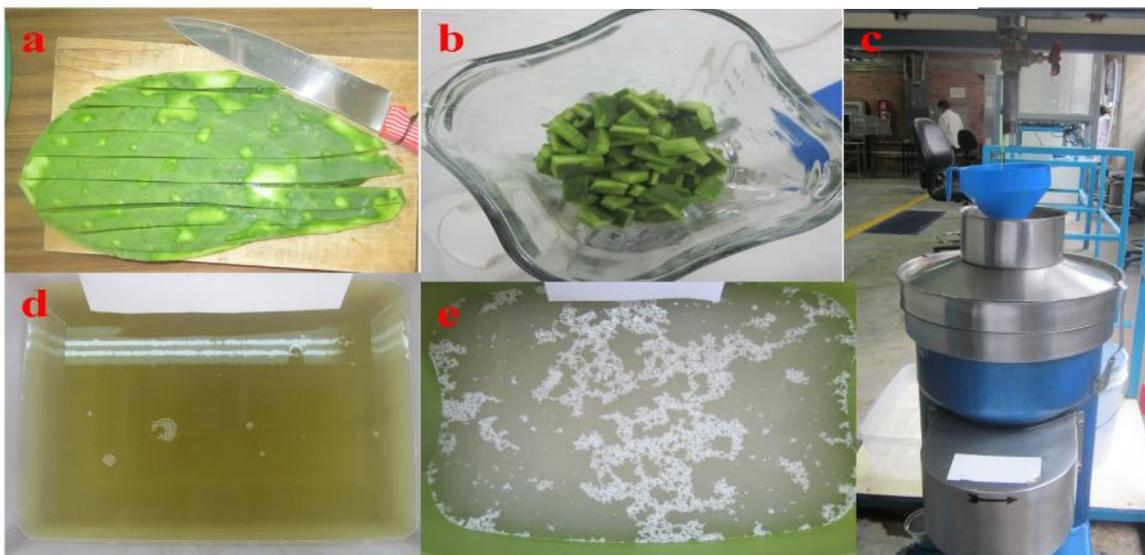


Figura 6. Proceso de extracción del mucílago de nopal: a) troceado, b) molienda, c) centrifugado, d) clarificado y e) separación de mucílago con etanol.

5.2.3. Elaboración de las películas comestibles

Las formulaciones preparadas se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 7. Formulación de las películas comestibles a base de mucílago de nopal.

Nomenclatura de película	Componente y concentración (% p/v)		
	Mucílago (M)	Cera de abeja (C)	Grenetina (G)
1 (G ₁)	-----	-----	0.5
2 (G ₂)	-----	-----	1
3 (G ₃)	-----	-----	1.5
4 (M ₁ G ₁)	0.5	-----	0.5
5 (M ₂ G ₁)	1	-----	0.5
6 (M ₃ G ₁)	1.5	-----	0.5
7 (M ₁ G ₂)	0.5	-----	1
8 (M ₂ G ₂)	1	-----	1
9 (M ₃ G ₂)	1.5	-----	1
10 (M ₁ G ₃)	0.5	-----	1.5
11 (M ₂ G ₃)	1	-----	1.5
12 (M ₃ G ₃)	1.5	-----	1.5
13 (M ₁ G ₁ C ₁)	0.5	0.5	0.5
14 (M ₃ G ₁ C ₁)	1.5	0.5	0.5
15 (M ₁ G ₁ C ₂)	0.5	1	0.5

* El porcentaje de Tween 80, glicerol, ácido oleico y aceite esencial de tomillo se mantuvo constante en todas las combinaciones siendo 0.9, 0.5, 0.5 y 0.2%, respectivamente.

El mucílago se dispersó lentamente en agua destilada a temperatura ambiente (25 °C) manteniendo una agitación constante y moderada, durante 24 h, en una parrilla con agitador magnético. A continuación la dispersión se calentó gradualmente desde temperatura ambiente hasta 35 °C y se adicionaron los componentes (grenetina y/o cera de abeja) y aditivos (Tween, glicerol, ácido oleico y aceite esencial de tomillo) en las cantidades correspondientes a cada formulación. La mezcla con todos los ingredientes se calentó a 90 °C para lograr la fusión de la cera de abeja y se homogeneizó con un Ultraturrax (Mod.T25 basic; IKA-Werke, Gmbh & Co. KG, Staufen, Alemania) durante 1 min a 12,000 rpm más 4 min a 22,000 rpm. Tras la homogeneización la dispersión se enfrió a temperatura ambiente (Navarro-Tarazaga., 2007).

Las dispersiones elaboradas fueron vaciadas en platos de plástico con 15 cm de diámetro. A cada recipiente se le adicionó 30 mL de cada una de las dispersiones. Finalmente, los recipientes se dejaron secar sobre una superficie plana y nivelada, a temperatura ambiente (25 °C y 50% H.R. aprox.) y por evaporación se formaron las películas (Atarés *et al.*, 2010).

Las películas se desprendieron de los platos de forma cuidadosa para evitar que se presentaran fisuras en la misma, posteriormente se colocaron en un desecador para acondicionarse con base en lo establecido en la norma ASTM D618-00 (ASTM D618, 2003) a una humedad relativa de $50\pm 5\%$ H.R. y temperatura constante de 23 ± 2 °C, condiciones que se establecieron utilizando disoluciones saturadas de $Mg(NO_3)_2$, manteniendo las películas en estas condiciones durante al menos 48 horas antes de su caracterización.

5.2.4. Caracterización de las películas comestibles

5.2.4.1. Propiedades físicas

5.2.4.1.1. Color: Los parámetros de color L (Luminosidad), a (contribución rojo-verde) y b (contribución azul-amarillo) de las diferentes películas fueron determinados en un colorímetro (marca Minolta modelo CR-300) por el sistema Hunter Lab. El instrumento fue

estandarizado con una placa de cerámica. Los valores L^* , a^* y b^* se utilizaron para calcular tono o *hue* ($h = \arctan(b^*/a^*)$) y *croma* ($C = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$). El color fue determinado en la media de 6 réplicas (Átares *et al.*, 2010).

5.2.4.1.2. Transparencia (Transmisión de luz): Muestras rectangulares de 0.5x0.4 cm se colocaron en celdas de un espectrofotómetro (marca GENESYS 10 UV-Visible) en forma perpendicular al paso de la luz. En cada muestra se evaluó la absorbancia en una longitud de onda de 550 nm. La transparencia de las películas fue calculada de acuerdo a la siguiente ecuación: $T=A_{550}/X$, siendo A_{550} la absorbancia y X el espesor de la película (mm). De acuerdo a esta ecuación un valor alto de T indica un grado de transparencia bajo. Como blanco se utilizó una celda vacía. El resultado se expresó como la transparencia de la media de 6 muestras (Al-Hassa y Norziah, 2011).

5.2.4.1.3. Espesor: El espesor fue medido en 6 posiciones aleatorias para cada película, 4 en el perímetro y dos en el centro utilizando un micrómetro digital (marca Mitutoyo, Modelo Quickmike Series 293-IP-54; Mitutoyo Corp., Kanawava, Japon). El promedio de las tres réplicas fue considerado el espesor final en mm (Imran *et al.*, 2010).

5.2.4.2. Propiedades de barrera

5.2.4.2.1. Permeabilidad al vapor de agua: Se calculó a través del método descrito por McHugh *et al.* (1993) y Gennadios *et al.* (1994) citados en Espino-Díaz *et al.* (2010) con algunas modificaciones. Las películas previamente acondicionadas y cortadas en forma circular fueron colocadas en celdas de prueba con 8.4 cm de diámetro. Las celdas se llenaron con cloruro de calcio anhidro ($CaCl_2$) para generar una humedad relativa (H.R.) de 0%. El desecante fue colocada dentro de la celda dejando un espacio de aire de 0.8 cm sobre su superficie. Un ambiente con 100% de H.R. se creó fuera de la celda (cámara de ambientación) con la ayuda de un humidificador ultrasónico (marca Samsung, modelo HU 820A) para asegurar una H.R. homogénea y constante. La temperatura dentro de la cámara de ambientación fue de 25 ± 2 °C. Una vez ensamblada la película en la celda de permeabilidad, se determinó su peso inicial y posteriormente fueron colocadas dentro de la cámara de ambientación con las condiciones ya citadas y se fue monitoreando la cinética de

pérdida de peso en lapsos de 90 min durante 24 h (de forma simultánea se supervisó la temperatura y la humedad relativa de prueba con un higrómetro (marca TFA, modelo H30. 5003) y mediante la pendiente de la regresión lineal se obtuvo la tasa de transmisión de vapor de agua (WVTR). Finalmente se calculó el transporte de vapor de agua con la siguiente ecuación (Espino-Díaz *et al.*, 2010):

$$WVP = \frac{WVTR * x}{p_3 - p_2}$$

$$p_2 = P - (P - p_1) \exp (R * T * Z * WVTR / P * D)$$

Donde: *WVP* es la permeabilidad a vapor de agua (g/m*s*Pa), *WVTR* es la tasa de transmisión de vapor de agua, *x* es el espesor de la película (m), *p₃* presión de vapor de agua dentro de la cámara (kPa), *p₂* es la presión de vapor de agua corregida (en kPa), *P* es la presión atmosférica total (kPa), *p₁* es presión parcial del vapor de agua en la superficie del desecante dentro de la celda (*p₁*=0), *T* es la temperatura absoluta durante la prueba (K), *R* constante universal de los gases (m³*kPa/g*K); *D* el coeficiente de difusión del vapor de agua en el aire (m²/día) y *Z* es el espacio entre solución y película (m²).

5.2.4.2.2. Permeabilidad a gases: La permeabilidad a gases fue determinado por el método descrito por Valle-Guadarrama *et al.* (2008). Las películas fueron colocadas en celdas de permeación a las que se les hizo un barrido de N₂ por 30 min para eliminar el O₂ en su interior. Posteriormente a cada celda se le inyectó 1 mL de CO₂ de alta pureza (98.2%). La cinética de pérdida de CO₂ y ganancia de O₂ fue determinada en un cromatógrafo de gases (Varian modelo 3400CX, USA) mediante monitoreo cada 15 min hasta la obtención de 8 lecturas. Los resultados se ajustaron mediante regresión de la ecuación (1) donde *k₁* se definió por la ecuación (2) y *k₂* (igual a *y_j^f - y_j^{d,0}*) fue la línea asintótica a la curva formada por la ecuación (1):

$$y_j^{d,t} = y_j^{d,0} + k_2(1 - e^{-k_1 t}) \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{R(T+273.15)P_j A^d}{V^d} \quad (2)$$

Donde R es la constante del gas ideal ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol K}$), T es la temperatura de prueba (K), V^d volumen interno de la celda (m^3), A es el área de la película (m^2), $y_j^{d,t}$ es la concentración de O_2 ó CO_2 en la celda con respecto al tiempo (%), $y_j^{d,0}$ es la concentración de O_2 ó CO_2 en la celda en el tiempo cero y P_j es la permeancia de la película ($\text{mol/s}\cdot\text{m}\cdot\text{Pa}$).

5.2.4.3. Propiedades mecánicas

La fuerza de fractura en punción y la fuerza de fractura en extensión fueron evaluadas utilizando una máquina de pruebas mecánicas (SINTECH 1/S, MTS, USA) usando una celda de carga de 100 N. La fuerza de fractura en punción fue determinado por el método descrito por Gontard *et al.* (1993) y Gijón-Arreortúa (2011) con ligeras modificaciones. Las películas previamente acondicionadas fueron cortadas en círculos de 8 cm de diámetro y fijadas a un soporte metálico. Posteriormente las películas fueron penetradas de manera uniaxial con una punta cilíndrica de 1.3 cm de diámetro a una velocidad de 60 mm/min (Figura 7). La resistencia a la penetración de 8 muestras se registró para cada formulación. La fuerza de fractura en extensión se determinó a temperatura ambiente (25 °C). Las películas previamente acondicionadas se cortaron en listones de 1 cm de ancho por 8 cm de largo. Los listones fueron sujetos por mordazas con una separación inicial de 5 cm. La velocidad de tracción fue de 60 mm/min y fue registrada la resistencia al estiramiento. Se probaron 15 muestras por formulación. El tratamiento de datos de las propiedades mecánicas se presenta en el apéndice A.

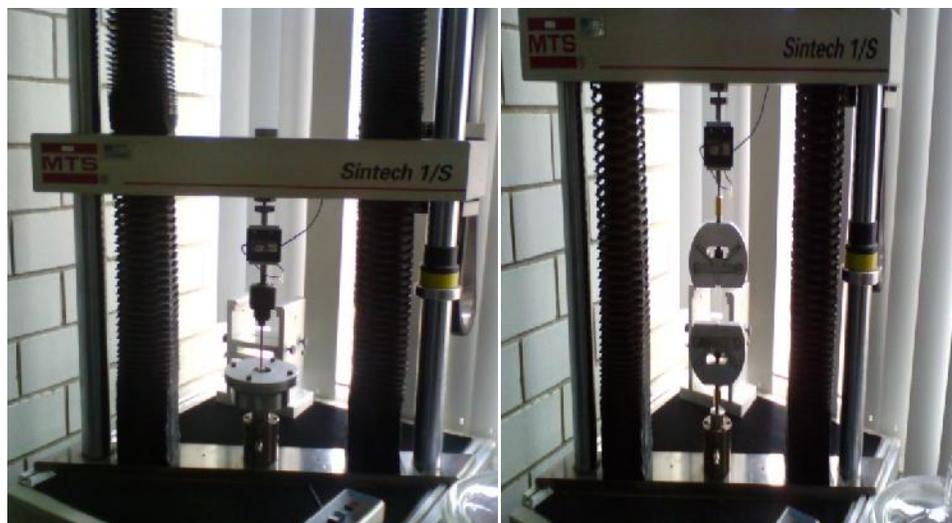


Figura 7. Máquina de pruebas mecánicas SINTECH 1/S.

5.2.4.4. Estructura microscópica

Las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) se llevaron a cabo utilizando un microscopio electrónico de barrido (marca, JEOL 35 CF Tokio, Japón). A cada una de las películas, previamente acondicionadas, se les tomaron imágenes de perfil y en la superficie (Jiménez *et al.*, 2010).

5.3. Aplicación del recubrimiento comestible en ciruela fresca

5.3.1. Material biológico

En el presente estudio, ciruelas (*Prunus salicina* L.) procedentes del estado de Puebla fueron transportadas en cajas vía terrestre y llevadas al laboratorio de Poscosecha de Productos Vegetales del Centro de Asimilación Tecnológica de la Facultad de Estudios Superiores, Cuautitlán, UNAM, donde se almacenaron a 4 °C hasta su posterior tratamiento.

5.3.2. Tratamiento de la muestra

La recepción y selección de las ciruelas se realizó con la finalidad de eliminar frutos maduros o con lesiones mecánicas y se aceptaron los de apariencia firme, exentas de hongos y con color homogéneo (rojo claro), así como olor agradable característico de la ciruela. Las ciruelas fueron lavadas con agua limpia a fin de eliminar las impurezas como tierra, hojas, etc., desinfectadas por inmersión con desinfectante comercial (marca Microdyn) con 8 gotas/L por 10 min y enjuagadas por 2 min (2 L de agua/kg), posteriormente se dejaron escurrir y secar con la ayuda de una corriente de aire proporcionada por un ventilador, en un tiempo aproximado de 30 minutos. Una vez secas, las ciruelas seleccionadas se dividieron en 3 lotes homogéneos: 2 para la aplicación de recubrimientos y 1 para el control lavado y desinfectado sin recubrir.

La aplicación de RC se realizó con las formulaciones 9 (M_3G_2) y 13 ($M_1G_1C_1$), consideradas las películas con las propiedades más apropiadas para ser aplicadas, las cuales fueron elaboradas como se mencionó en la sección 5.2.3. Los recubrimientos se aplicaron por inmersión del fruto durante 1.5 minutos a temperatura de 25 °C. Las ciruelas con y sin recubrimiento se depositaron sobre rejillas para escurrir el exceso de la dispersión formadora y permitir un secado uniforme con la ayuda de una corriente de aire proporcionada por un ventilador. Una vez secas en su totalidad, las ciruelas se colocaron en recipientes de plástico identificados, se almacenaron en refrigeración a 1 °C y 85±5% H.R. durante 30 días, más 6 días a 25 °C y 50±5% H.R (Navarro-Tarazaga., 2007). Los análisis de calidad de la fruta se realizaron de acuerdo a las técnicas descritas en el apartado 5.3.3, cada 6 días y por triplicado desde el inicio de su almacenamiento.

5.3.3. Parámetros de calidad

5.3.3.1. Pérdida de peso: Se llevó a cabo utilizando una balanza analítica (marca Citizen, modelo CY204) obteniendo la variación del peso del producto al inicio y después de determinados periodos de conservación. El resultado se expresó como porcentaje de pérdida de peso respecto al peso inicial.

5.3.3.2. Firmeza: Se determinó utilizando un penetrómetro manual (marca Tr-Fruit Pressure Tester, modelo FT327), introduciendo el cilindro metálico sobre una de las caras de la zona media de cada fruta: La firmeza se evaluó como la fuerza necesaria para penetrar la pulpa de la ciruela y se expresó en MPa.

5.3.3.3. Sólidos solubles: El contenido de sólidos solubles se midió directamente con un refractómetro de mano (marca Atago) a temperatura ambiente, previamente calibrado y ajustado a temperatura ambiente. Los resultados se expresaron como °Brix.

5.3.3.4. pH y % acidez titulable: Se determinó utilizando un potenciómetro manual (marca Hanna Instruments, modelo pHp1) a temperatura ambiente. Se pesaron 10 g de muestra las cuales se mezclaron con 90 mL de agua destilada, posteriormente la mezcla fue filtrada. A la solución obtenida del filtrado se le sumergió el electrodo del potenciómetro obteniendo la lectura del pH de forma directa. La acidez se determinó por titulación directa valorando alícuotas de 10 mL de solución filtrada con una solución de NaOH 0.1N. La acidez del producto se expresa como el porcentaje de ácido málico (AOAC, 1990).

5.3.3.5. Determinación de color: La determinación se llevó a cabo mediante la utilización de un colorímetro (marca Minolta, modelo CR-300) por el sistema Hunter Lab. La medición se realizó en la parte exterior y zona ecuatorial de las ciruelas. Con las lecturas obtenidas se calculó el tono o ángulo *hue* ($h^\circ = \arctan(b^*/a^*)$), *croma* ($C = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$) y luminosidad. Las determinaciones se hicieron en la media de 6 réplicas (McGuire, 1992).

5.3.4. Análisis sensorial: La evaluación sensorial se llevó a cabo mediante un panel formado por al menos 10 jueces entrenados específicamente para identificar los diferentes cambios en las propiedades sensoriales de la ciruela. Se evaluaron, usando una escala hedónica de 5 puntos, apariencia visual, intensidad de color, olor, olores extraños, sabor, sabores extraños, textura y calidad global o aceptabilidad (Olarde *et al.*, 2009). Ver cuadro 8.

Cuadro 8. Escala hedónica de 5 puntos para diferentes características sensoriales.

	Escala General	Olor y sabor extraños	Firmeza	Intensidad de color
1	Muy mala	Mucha	Muy blanda	Extremadamente rojo (rojo oscuro)
2	Mala	Alguna	Blanda	Rojo intenso
3	Aceptable como límite de consumo			Rojo
4	Buena	Leve	Firme	Rojo claro
5	Muy buena	Ninguna	Muy firme	Naranja

5.3.5. Parámetros fisiológicos

5.3.5.1. Respiración: Para determinar la respiración se utilizó el método estático. Se utilizaron como contenedores frascos de vidrio los cuales se cerraron herméticamente durante 1 h y tras finalizar este periodo se conectó la salida del frasco que contiene la muestra a un analizador de gases por infrarrojo (marca Analyzer Nite). Los resultados se expresaron en mg de CO₂/kg*h.

5.3.5.2. Desórdenes Fisiológicos: Para la determinación de los desórdenes fisiológicos se utilizó el método descrito por Navarro-Tarazaga *et al.* (2011) con ligeras modificaciones, en donde se evaluó la pigmentación roja o “*bleeding*” y harinosidad, pardeamiento y transparencia o “*gel breakdown*”. Se analizaron 20 frutos por tratamiento, los cuales fueron seccionados por la zona ecuatorial, haciendo la evaluación visual del mesocarpio y del área circundante al hueso. El “*bleeding*” y la harinosidad se evaluaron con una escala de 1 a 3 (1= ausencia; 2= moderado; 3= severo). El pardeamiento y “*gel breakdown*” se evaluaron con una escala de 1 a 6 (1= ausencia; 2= muy ligero; 3= ligero; 4= moderado; 5= severo; 6= extremo). Con un área afectada menor al 50% y superior al 75%, se consideraron daños moderados y extremos, respectivamente. Se calculó la media aritmética para cada desorden, expresando el resultado como índice de daño correspondiente a cada alteración.

5.4. Análisis estadístico

Los datos para la caracterización de películas fueron evaluados a través de un Análisis de Varianza (ANOVA), seguido de una prueba de comparación de medias de Duncan, estableciendo una significancia () =0.05. Los análisis se efectuaron utilizando el paquete estadístico IBM, SPSS Statistics (versión 20.0).

Para evaluar el efecto de la aplicación de los recubrimientos comestibles a los parámetros de calidad y fisiológicos de las ciruelas se sometieron a un Análisis de Varianza (ANOVA) y a una prueba de comparación de medias de Duncan estableciendo una significancia () =0.05. Los análisis se efectuaron utilizando el paquete estadístico IBM, SPSS Statistics (versión 20.0).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS COMESTIBLES

6.1.1 Propiedades Físicas

6.1.1.1. Color

- *Luminosidad*

La luminosidad presentada en las películas (Figura 8) se vio afectada por la composición de cada formulación, siendo las películas de un solo componente (gretetina) las de mayor luminosidad y las de menor aquellas con tres componentes (gretetina, mucílago de nopal y cera de abeja), lo cual indica que la adición de más de un componente y de lípidos principalmente, reduce la luminosidad en la mismas. Las películas elaboradas únicamente con gretetina presentaron los valores más altos ($P_{\text{romedio}}=83.3$) en comparación con las elaboradas de mucílago de nopal con gretetina y cera de abeja las cuales presentaron los valores más bajos ($P_{\text{romedio}}=76.85$).

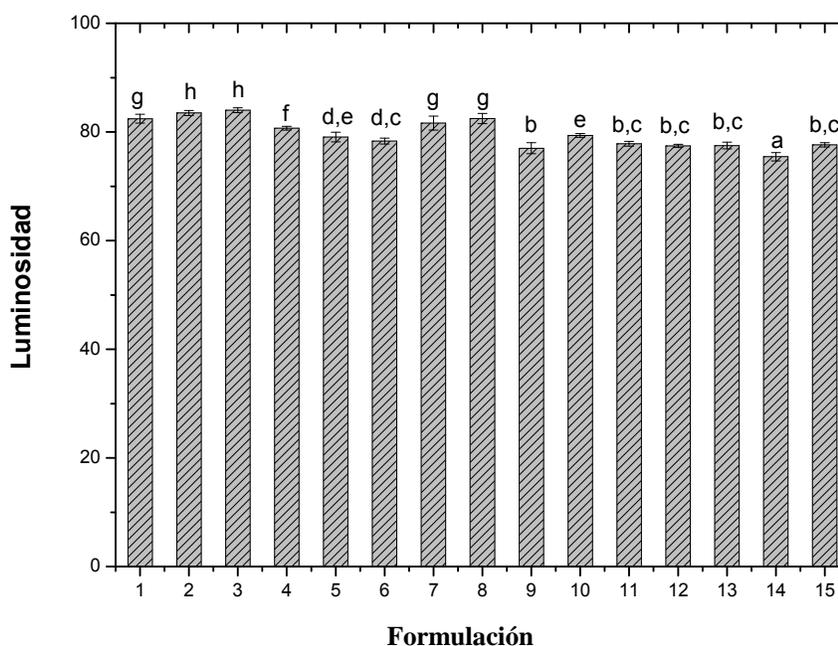


Figura 8. Luminosidad de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal.

Los números en el eje de las Abscisas representan la formulación empleada para cada película comestible; 1 (G_1), 2 (G_2), 3 (G_3), 4 (M_1G_1), 5 (M_2G_1), 6 (M_3G_1), 7 (M_1G_2), 8 (M_2G_2), 9 (M_3G_2), 10 (M_1G_3), 11 (M_2G_3), 12 (M_3G_3), 13 ($M_1G_1C_1$), 14 ($M_3G_1C_1$), 15 ($M_1G_1C_2$). M=mucílago, G=gretetina, C=cera de abeja y 1=0.5%, 2=1%, 3=1.5 %. Las barras verticales representan la media de 6 películas \pm SD. Diferentes letras indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

Todas las películas elaboradas con mucílago de nopal mostraron valores de luminosidad por arriba de 75 y con un promedio de $L=78.698$. Las películas con mayor luminosidad fueron las elaboradas con 1.5% de grenetina (F-3), con valores 10.19% mayores con respecto a las películas de la formulación 14 (1.5% de grenetina, 0.5% cera de abeja y 0.5% de mucílago de nopal), las cuales presentaron los valores más bajos. Además, se observó diferencia significativa ($p < 0.05$) en la luminosidad de las películas con las diferentes formulaciones.

Los resultados indican que el uso de cera de abeja en la elaboración de películas comestibles disminuyó aproximadamente un 4% la luminosidad de las películas a base de mucílago de nopal, esto debido probablemente a que este compuesto es insoluble en agua, lo que genera una fase no miscible y agregados lipídicos en la superficie de las PC como resultado de un proceso de cremado y coalescencia durante el secado, promoviendo la opacidad de las mismas como resultado de una mayor dispersión de la luz (Monedero *et al.*, 2009).

Por otro lado comparando los resultados de luminosidad obtenidos en otros trabajos donde se utilizó mucílago de nopal se puede observar que Espino-Díaz *et al.* (2010) obtuvo valores más altos ($L_{\text{promedio}}=93$) tal vez debido a que trabajó sólo con mucílago de nopal sin agregar otros componentes (salvo el glicerol como plastificante). En el trabajo de Lira-Vargas (2012) se reportan valores de luminosidad promedio de 41.6, los cuales son mucho menores a los obtenidos en este trabajo, debido probablemente a que además de usar más de un componente en sus formulaciones, durante la elaboración de las películas no se lleva a cabo una buena homogeneización de la dispersión formadora de las películas. En el trabajo de Abraján-Villaseñor (2008) se reportan valores de luminosidad ($L_{\text{promedio}}=72.7$) más cercanos a los de este trabajo. Por otro lado Muñoz *et al.* (2012) y Pires *et al.* (2011) que trabajaron con películas de mucílago de *Salvia hispanica* con proteínas de suero concentrado y de merluza con aceite de tomillo presentaron valores de luminosidad que van de 89.53 a 91.30 y de 93.46 a 93.88, respectivamente, los cuales están ligeramente por arriba de los obtenidos en el presente trabajo.

- **Croma:**

El croma presentado en las películas elaboradas se vio afectado por la composición de cada formulación, siendo las películas de un solo componente (grenetina) las de mayor croma y con una disminución en el mismo en la medida que la concentración de la proteína aumentó. Por otro lado, no fueron las películas con tres componentes las de menor croma, sino las elaboradas con dos componentes y con el 1% de grenetina en su formulación (F-5, 8 y 11), lo que indica la influencia de la grenetina en la disminución del croma en las películas binarias, destacando que es esta concentración específica la que influye en la reducción en los valores de esta propiedad.

Las películas que presentaron mayor croma fueron las elaboradas únicamente con grenetina, con un valor promedio de 6.52. Las películas con la formulación 1 (0.5% de grenetina) fueron las que presentaron 80% mayor croma en comparación con las de la formulación 8 (1% mucílago y 1% de grenetina), que fueron las del valor más bajo (Figura 9). Además, se observó diferencia significativa ($p < 0.05$) en el croma de las películas con las diferentes formulaciones.

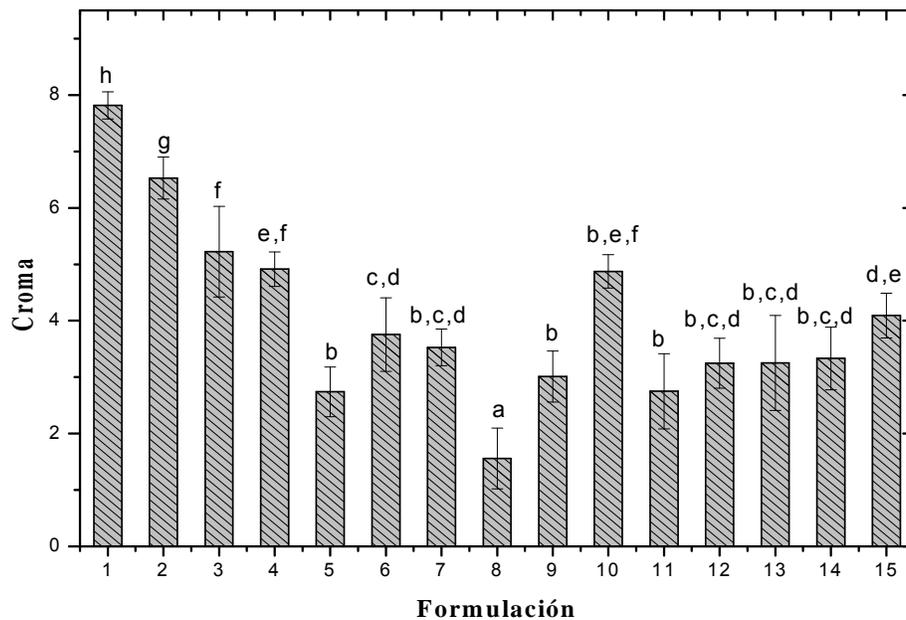


Figura 9. Croma de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal.

Los números en el eje de las Abscisas representan la formulación empleada para cada película comestible; 1 (G₁), 2 (G₂), 3 (G₃), 4 (M₁G₁), 5 (M₂G₁), 6 (M₃G₁), 7 (M₁G₂), 8 (M₂G₂), 9 (M₃G₂), 10 (M₁G₃), 11 (M₂G₃), 12 (M₃G₃), 13 (M₁G₁C₁), 14 (M₃G₁C₁), 15 (M₁G₁C₂). M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja y 1=0.5%, 2=1%, 3=1.5%. Las barras verticales representan la media de 6 películas ± SD. Diferentes letras indican diferencia significativa (P < 0.05).

De manera general las películas presentaron valores bajos de croma (promedio de 4.04) lo que indica un color menos saturado y por lo tanto, independientemente del tono que presenten, se caracterizan por sus colores grisáceos, lo que podría afectar la apariencia visual del producto hortofrutícola al que se aplicaran en forma de RC.

Finalmente, los valores reportados en los trabajos de Espino-Díaz *et al.* (2010) y Abraján-Villaseñor (2008) van de $C=7.93-16.27$ y de $C=16.1-28.8$, respectivamente, siendo mucho más altos y difieren de manera considerable a los del presente trabajo. Por otro lado, Lira-Vargas (2012) y Pires *et al.* (2011) reportan valores aproximados de 6, los cuales se acercan más a los del presente estudio.

- **Tono:**

El tono representa el color dominante o verdadero tal y como es percibido por un observador. En las películas se vio afectado por la composición de cada formulación, siendo aquellas con un solo componente (grenetina) las de mayor tono, mostrándose una disminución en el mismo en la medida que la concentración de la proteína aumentó. Sin embargo, no hubo una tendencia clara en la influencia que tuvieron el mucílago de nopal, la cera de abeja y grenetina en la variación de los valores de tono en las películas elaboradas con dos y tres componentes, por lo que no puede indicarse de manera clara su influencia en las mismas.

Las películas que presentaron el mayor tono fueron las constituidas únicamente de grenetina. Las películas con el 1% de grenetina fueron las que presentaron 75% mayor tono en comparación con las constituidas con 1% mucílago y 1.5% grenetina, las cuales presentaron el valor más bajo (Figura 10). Además, se observó diferencia significativa ($p < 0.05$) en el tono de las películas con las diferentes formulaciones.

Las películas obtenidas se encuentran en el cuadrante de los tonos rojo-amarillo. Dentro de los estudios donde también se utilizó mucílago de nopal, el único con el que concuerda el presente trabajo es con el realizado por Abraján-Villaseñor (2008), el cual tiene tonos dentro del mismo cuadrante y presenta valores que van desde 64-71.3, mencionando que es

tal vez el ácido oleico el que imparte el color ligeramente amarillo y que a medida que éste se oxida, se vuelve más rojizo. Por otro lado, en estudios realizados por Espino-Díaz *et al.* (2010) y Lira-Vargas (2012) se han presentado valores de tono que van de 70 hasta 99.6, reportando tonalidades que están dentro del cuadrante verde-amarillo a pesar de haber trabajado con el mismo material.

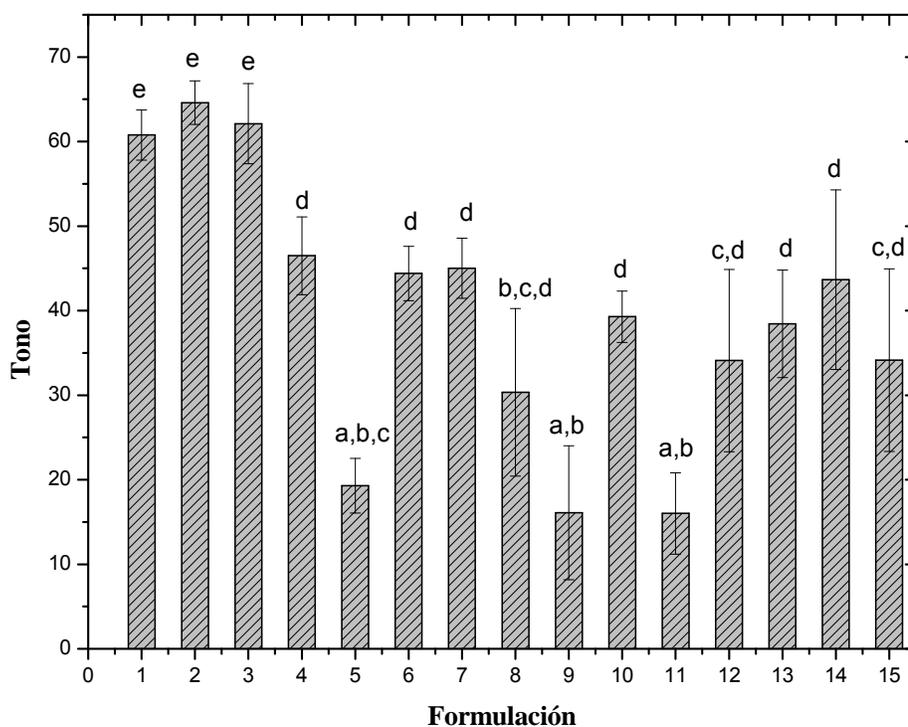


Figura 10. Tono de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal.

Los números en el eje de las Abscisas representan la formulación empleada para cada película comestible; 1 (G₁), 2 (G₂), 3 (G₃), 4 (M₁G₁), 5 (M₂G₁), 6 (M₃G₁), 7 (M₁G₂), 8 (M₂G₂), 9 (M₃G₂), 10 (M₁G₃), 11 (M₂G₃), 12 (M₃G₃), 13 (M₁G₁C₁), 14 (M₃G₁C₁), 15 (M₁G₁C₂). M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja y 1=0.5%, 2=1%, 3=1.5 %. Las barras verticales representan la media de 6 películas ± SD. Diferentes letras indican diferencia significativa (P 0.05).

Por otro lado, debe mencionarse que, de manera general, las propiedades ópticas (luminosidad y croma) de las diferentes películas se vieron afectadas por la naturaleza, número de componentes y concentración de los mismos, pues al aumentar estos y por la adición de la cera de abeja, la saturación disminuyó obteniéndose películas más grisáceas y opacas con valores bajos de croma y luminosidad.

Así mismo, puede observarse que la solubilidad al agua que presentan los diferentes componentes de las películas influyen en sus propiedades ópticas, pues como en el caso de los hidrocoloides (grenetina y mucílago de nopal), los cuales presentan una buena

solubilidad al agua, no repercutieron de manera directa en las propiedades ópticas de las películas y lo hicieron de manera indirecta al aumentar la concentración de los mismos disminuyendo su luminosidad y croma, sin embargo en el caso de la cera de abeja el efecto sí se presentó de manera directa, ya que al adicionarse se obtuvieron películas más grisáceas y menos luminosas debido a que este compuesto es insoluble en agua, generando una fase no miscible y agregados lipídicos en la superficie de las PC promoviendo la opacidad de las mismas como resultado de una mayor dispersión de la luz (Monedero *et al.*, 2009).

Asimismo, puede mencionarse que se obtuvieron películas de aspecto mate en la cara expuesta al aire durante el secado y de aspecto brillante en la cara que estuvo en contacto con la placa de secado y sin contacto al aire durante el proceso. También pudo observarse que al adicionar cera se acentuó la diferencia en los aspectos de ambas caras lo que podría deberse a que se presentó una separación de fases durante el secado de las películas ocasionado por un fenómeno de coalescencia y cremado, lo que produjo la migración de gotas lipídicas a la superficie promoviendo una mayor rugosidad, provocando así el aspecto mate en la cara expuesta al aire (Monedero *et al.*, 2009).

6.1.1.2. Transparencia

La transparencia es una propiedad importante en las películas comestibles sobre todo cuando van a ser aplicadas como cubiertas en alimentos, ya que tienen un impacto directo en la apariencia de los mismos. Además, muchas veces es un criterio que nos permite juzgar la compatibilidad de los componentes de las películas, pues si la compatibilidad de estos no es buena la transmitancia de la luz es baja debido a la dispersión y reflexión de la luz (Ma *et al.*, 2012).

La transparencia presentada en las películas (Figura 11) se vio afectado por la composición de cada formulación, siendo las películas de un solo componente (gretina) las de mayor transparencia y las de menor aquellas que contienen tres componentes (gretina, mucílago de nopal y cera de abeja), lo cual indica que la adición de más de un componente y

principalmente de cera de abeja, reduce la transparencia en las películas como ya lo han mencionado algunos autores (Pérez-Gago y Krochta, 2001; Bertan *et al.*, 2005).

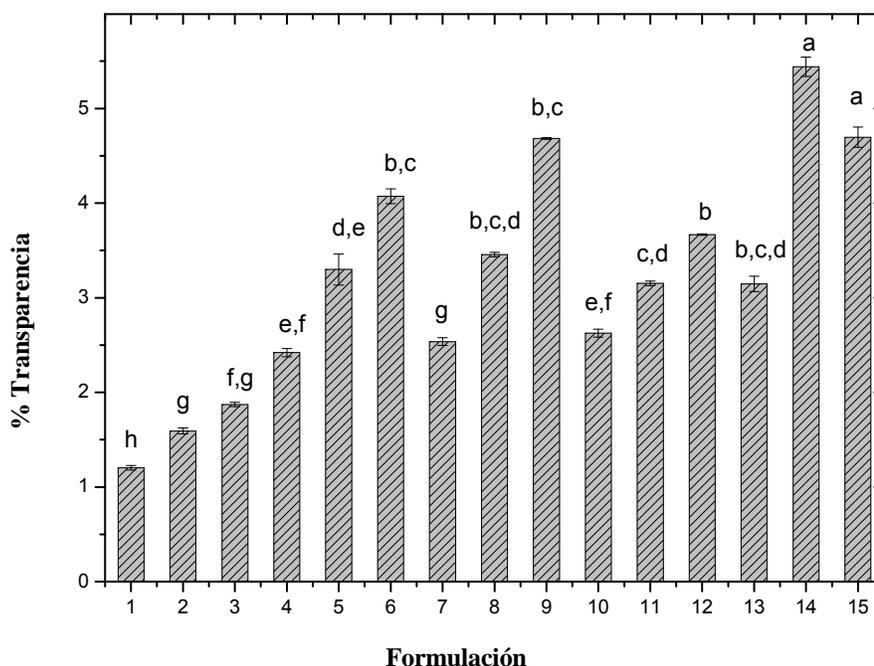


Figura 11. Transparencia de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal.

Los números en el eje de las Abscisas representan la formulación empleada para cada película comestible; 1 (G₁), 2 (G₂), 3 (G₃), 4 (M₁G₁), 5 (M₂G₁), 6 (M₃G₁), 7 (M₁G₂), 8 (M₂G₂), 9 (M₃G₂), 10 (M₁G₃), 11 (M₂G₃), 12 (M₃G₃), 13 (M₁G₁C₁), 14 (M₃G₁C₁), 15 (M₁G₁C₂). M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja y 1=0.5%, 2=1%, 3=1.5 %. Las barras verticales representan la media de 6 películas \pm SD. Diferentes letras indican diferencia significativa (P 0.05).

Las películas con la formulación 1 (0.5% grenetina) presentaron aproximadamente 5 veces mayor transparencia (T=1.20) en comparación con las películas de la formulación 14 (1.5% mucílago, 0.5% cera de abeja, 0.5% grenetina), las cuales presentaron el valor más bajo (T=5.44), lo cual indicó que fueron las más opacas.

De manera general, puede observarse que a medida que aumenta el número de componentes y la concentración de los mismos (grenetina, mucílago de nopal y cera de abeja) la transparencia de las películas se ve reducida. Lo anterior está relacionado a un aumento del espesor de las mismas, pues si la película es más delgada la luz puede pasar parcialmente a través de las mismas, provocando una mayor transparencia, sin embargo si el espesor aumenta el material se vuelve más opaco debido a un menor paso de la luz (Fakhoury *et al.*, 2012). Asimismo, puede observarse que la adición de cera de abeja influyó

directamente en el aumento de la opacidad en las películas, debido principalmente a que este compuesto es insoluble en agua, generando una fase no miscible y agregados lípidicos en la superficie de la película promoviendo una baja transmitancia debido a una mayor dispersión de la luz en la superficie de la película (Monedero *et al.*, 2009).

Estadísticamente el efecto de la transparencia presentó diferencia significativa ($p < 0.05$), ocasionada principalmente por la diferente formulación de cada película elaborada.

La transparencia promedio para todas las películas con mucílago de nopal y grenetina fue de 3.32, valores que se acercan a los presentados en los trabajos de Ma *et al.* (2012) para películas de gelatina con el 5% de aceite de olivo ($T=3.28$) y con los presentados por Limpisophon *et al.* (2010) en películas con gelatina y ácido esteárico ($T=2.31-3.47$).

Finalmente, el valor promedio de transparencia para las películas con mucílago de nopal, grenetina y cera de abeja fue de 4.44 que está más cercano a los presentados en los trabajos de Pires *et al.* (2013) en películas compuestas por proteína de pescado y aceite esencial de estragón o tarragona (*Artemisia dracunculus*) y de cilantro (*Coriandrum sativum*) con valores de transparencia de 4.15 y 4.85, respectivamente, Ma *et al.* (2012) para películas con el 15 % de aceite de oliva y gelatina ($T=4.70$) y Limpisophon *et al.* (2010) para películas con gelatina y ácido oleico ($T=4.09-5.56$).

6.1.1.3. Espesor

La determinación del espesor es un parámetro importante y necesario para la evaluación de las propiedades mecánicas y de barrera en PC. El espesor de las películas se vio afectado por la composición y naturaleza de sus componentes, además de la concentración de los mismos. En la medida que la concentración y el número de componentes aumentó, el espesor de las películas también lo hizo, siendo las películas con 3 componentes las que presentaron, en promedio, el mayor espesor, seguidas de las elaboradas con 2 y 1 componentes, respectivamente (Figura 12).

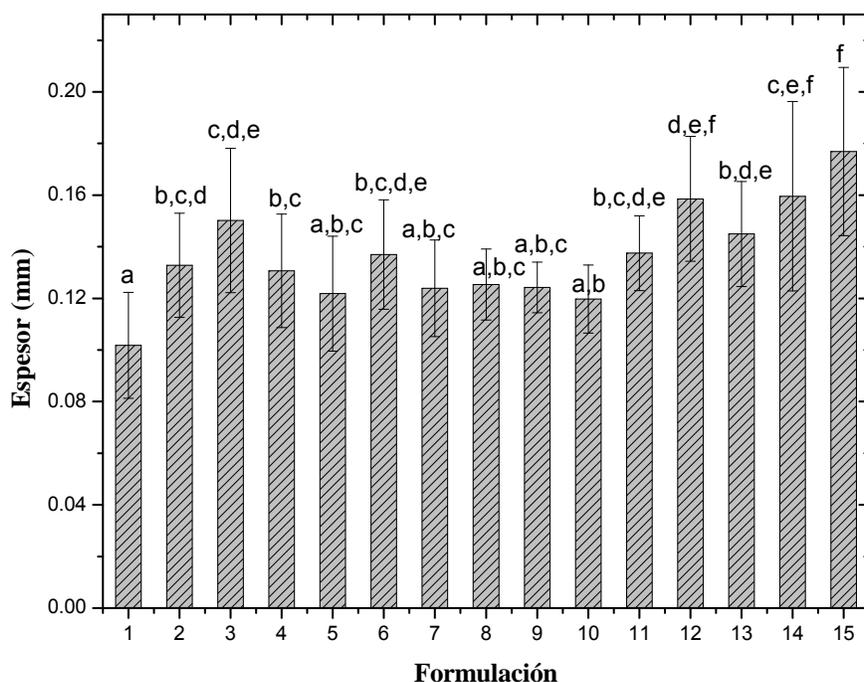


Figura 12. Espesor (mm) de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal.

Los números en el eje de las Abscisas representan la formulación empleada para cada película comestible; 1 (G₁), 2 (G₂), 3 (G₃), 4 (M₁G₁), 5 (M₂G₁), 6 (M₃G₁), 7 (M₁G₂), 8 (M₂G₂), 9 (M₃G₂), 10 (M₁G₃), 11 (M₂G₃), 12 (M₃G₃), 13 (M₁G₁C₁), 14 (M₃G₁C₁), 15 (M₁G₁C₂). M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja y 1=0.5%, 2=1%, 3=1.5 %. Las barras verticales representan la media de 6 películas ± SD. Diferentes letras indican diferencia significativa (P 0.05).

Asimismo, la naturaleza de los componentes (y la interacción entre ellos) que conforman las películas también influyen de manera directa en el espesor de las mismas, por lo que aunque el contenido sólidos sea el mismo en algunas formulaciones, su espesor no presenta los mismos valores. Para el caso de las películas de dos componentes, es la grenetina el componente que más influyó en el aumento del espesor, lo que podría deberse a que presenta buenas propiedades de gelificación y un alto índice de hinchamiento (Dangaran *et al.*, 2009).

De la misma manera, las películas que contienen cera de abeja en su formulación presentaron un mayor aumento en su espesor, probablemente ocasionado por un fenómeno de coalescencia y cremado durante el proceso de secado, produciendo la migración de gotas lipídicas a la superficie de las películas, incrementando su rugosidad (Zúñiga *et al.*, 2012) y provocando un mayor espesor en las mismas como se muestra también en la microscopía electrónica de barrido y lo cual concuerda con diversos autores que han mencionado que las

películas con sustancias hidrofóbicas en su formulación, tales como las ceras, tienden a ser más gruesas y quebradizas, aunque contribuyen a disminuir la transferencia de vapor de agua (Osés *et al.*, 2009; Sanchez-Gonzalez., 2009).

Las películas con 0.5% grenetina (F-1) presentaron 57.6% menor espesor (0.102 mm), en comparación con las elaboradas con 0.5% mucílago de nopal, 1% de cera de abeja y 0.5% de grenetina (F-15) las cuales presentaron el valor más alto (0.177 mm).

El espesor promedio para las películas con mucílago de nopal y grenetina fue de 0.131 y 0.160 mm para aquellas que contienen cera de abeja, presentándose una diferencia significativa ($p < 0.05$), ocasionada por la composición y naturaleza de sus componentes, además de la concentración de los mismos. Estos espesores son próximos a los reportados por Soazo *et al.* (2011) y Abugoch *et al.* (2011) que realizaron películas comestibles de proteína de suero con cera de abeja y quitosano con proteína, reportando espesores de 0.154 mm y de 0.125-0.142 mm, respectivamente. Además de los reportados por Espino-Díaz *et al.* (2010) que son de 0.131 y 0.1095 mm para películas de mucílago de nopal con y sin calcio, respectivamente.

Por otro lado, los espesores registrados en este trabajo son menores a los reportados por Murillo-Martínez *et al.* (2011) para películas de proteína de suero con carboximetilcelulosa y proteína de suero con pectina de bajo metoxilo (0.185 y 0.200 mm, respectivamente), además de los descritos por Abraján-Villaseñor (2008) quien también trabajó con mucílago de nopal (0.209, 0.198-0.209 y 0.215-0.223 mm para películas con mucílago de nopal, mucílago de nopal con ácido oleico y mucílago de nopal con ácido esteárico), aunque mayores a los obtenidos por Muñoz *et al.* (2012) y Monedero *et al.* (2009) que realizaron películas con mucílago de semilla de chía con proteína de suero concentrada y glicerol y de proteína de soya con cera de abeja y ácido oleico, reportando espesores de 0.090-0.110 y 0.099-0.113 mm, respectivamente.

6.1.2. Propiedades de Barrera

6.1.2.1. Permeabilidad a vapor de agua

La permeabilidad al vapor de agua (PVA) en las películas es una propiedad importante a considerar cuando son seleccionadas para su uso en productos específicos, ya que nos pueden indicar su capacidad para proteger al producto de la pérdida de peso y/o deshidratación.

En todas las formulaciones la PVA presentó diferencia significativa ($p < 0.05$), exceptuando las películas 2, 4, 6, 7 y 8. En la figura 13 se puede observar que las películas con cera de abeja fueron las que presentaron menor permeabilidad en comparación con aquellas constituidas únicamente por hidrocoloides. En promedio, el grupo de películas elaboradas con hidrocoloides presentó 35% mayor PVA en comparación con aquellas adicionadas con cera de abeja, siendo este componente el que mayor influencia tuvo en la disminución de la permeabilidad a vapor de agua.

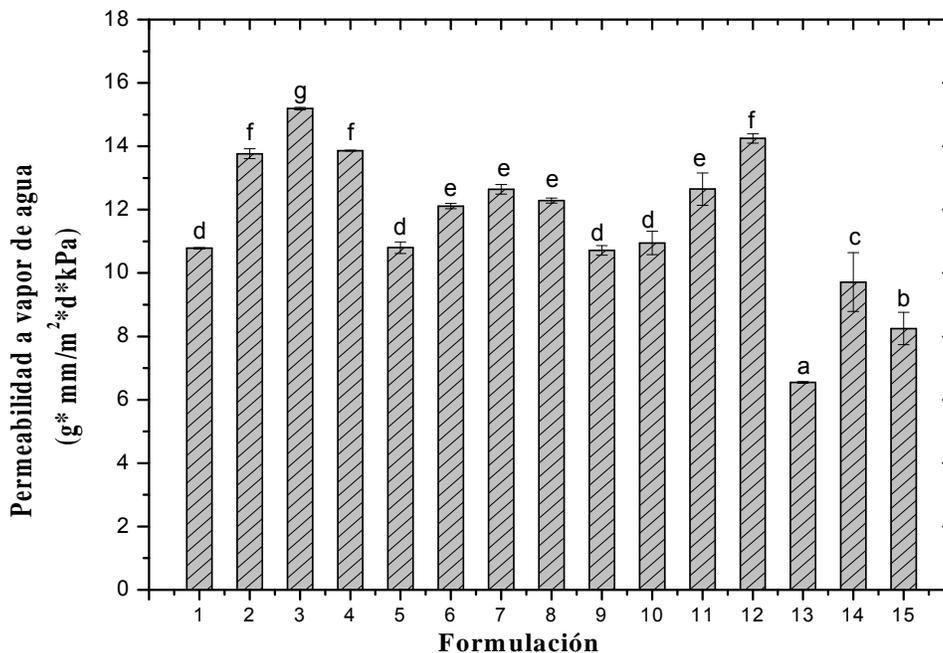


Figura 13. Permeabilidad al vapor de agua ($\text{g} \cdot \text{mm} / \text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$) de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal. Los números en el eje de las Abscisas representan la formulación empleada para cada película comestible; 1 (G_1), 2 (G_2), 3 (G_3), 4 (M_1G_1), 5 (M_2G_1), 6 (M_3G_1), 7 (M_1G_2), 8 (M_2G_2), 9 (M_3G_2), 10 (M_1G_3), 11 (M_2G_3), 12 (M_3G_3), 13 ($M_1G_1C_1$), 14 ($M_3G_1C_1$), 15 ($M_1G_1C_2$). M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja y 1=0.5%, 2=1%, 3=1.5%. Las barras verticales representan la media de 6 películas \pm SD. Diferentes letras indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

Asimismo, las películas elaboradas con 0.5% mucílago de nopal, 0.5% cera de abeja y 0.5% grenetina (F-13) fueron las que presentaron 56.9% menor PVA, con un valor de $6.547 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{kPa}$, seguidas de las elaboradas con 1.5% de mucílago de nopal con 1% de grenetina (F-9), con un valor de $10.714 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{kPa}$, en contraste con las elaboradas con 1.5% de grenetina (F-3), las cuales presentaron la mayor PVA con un valor de $15.189 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{kPa}$. Estos resultados confirman que los hidrocoloides (polisacáridos y proteínas) por su carácter hidrofílico forman películas con mayor PVA que aquellas con lípidos en su formulación.

Por otro lado, según la bibliografía, al aumentar el contenido de lípidos se mejora la barrera al vapor de agua de las películas, siempre y cuando el lípido se distribuya o disperse de forma homogénea en la matriz del hidrocoloide, lo que aumentaría la longitud de la trayectoria de migración (tortuosidad) de las moléculas de agua y/o inmovilizaría el hidrocoloide en la interface lo que daría como resultado una estructura más ordenada y fuertemente reticulada o entrelazada (Pérez-Gago y Krochta, 2005; Debeaufort y Voilley, 1995; Mc Hugh y Krochta, 1994a). Sin embargo, en este trabajo las películas elaboradas con 1% de cera de abeja, 0.5% de mucílago de nopal y 0.5% de grenetina presentaron una mayor PVA (con una diferencia significativa $p < 0.05$) que aquellas con el 0.5% de cera de abeja, 0.5% de mucílago de nopal y 0.5% de grenetina, que fueron las que presentaron una menor permeabilidad, lo que nos indicaría que aunque la cantidad del lípido fue mayor, la distribución del mismo en la matriz no se dio de manera totalmente homogénea. Además, algunos trabajos señalan que existe un contenido de lípido crítico a partir del cual la PVA ya no se mejora e inclusive muchas veces aumenta, atribuyéndolo a una saturación del lípido en la formulación o a una mala distribución del lípido en la matriz del hidrocoloide (Pérez-Gago y Krochta, 2005; Avena-Bustillos y Krochta, 1993). Por lo que en este trabajo el aumento de cera de abeja pudo significar una dificultad de las misma para su mejor distribución en la matriz de mucílago de nopal y grenetina, lo que también produjo la coalescencia de las partículas de cera de abeja durante el secado de las películas que se vio reflejado en la presencia de agregados de cera de abeja en las películas secas.

Aunque la PVA de las películas a base de biopolímeros es difícil de comparar, debido a la gran cantidad de condiciones de prueba utilizadas en los diferentes trabajos y a que esta

propiedad se ve influida de manera considerable por varios factores como la temperatura, la humedad relativa y los gradientes de humedad utilizados en la prueba, los cuales influyen en las propiedades de barrera (Gijón-Arreortúa, 2011; Pérez-Gago y Krochta, 2005), a continuación se hace una comparación con algunos trabajos revisados en donde se puede observar, de manera general, que la adición de algún lípido disminuye la PVA de las películas. Asimismo, la PVA fue intermedia a la reportada en otros trabajos con hidrocoloides, debido probablemente al diferente carácter hidrofílico de cada material estudiado. Los valores promedio de PVA en este trabajo fueron de 12.50 g*mm/m²*d*kPa para películas con grenetina y mucílago de nopal y 8.173 g*mm/m²*d*kPa para aquellas con mucílago de nopal, grenetina y cera de abeja. La PVA obtenida en este trabajo para películas con mucílago de nopal con grenetina, está por debajo de los obtenidos por Navarro-Tarazaga *et al.* (2011) en películas con hidroxipropilmetilcelulosa (178.848 g*mm/m²*d*kPa), Wang *et al.* (2011) para películas de puré de Zanahoria con grenetina y carboximetilcelulosa (183.168 a 232.416 g*mm/m²*d*kPa), Espino-Díaz *et al.* (2010) en películas con mucílago de nopal con y sin adición de calcio (109.935 y 130.453 g*mm/m²*d*kPa, respectivamente) y Abraján-Villaseñor (2008) en películas de mucílago de nopal (286.848 g*mm/m²*d*kPa) y de mucílago con ácido oleico, en proporciones de 1:0.25, 1:0.35 y 1:0.50 (209.088, 158.976 y 134.784 g*mm/m²*d*kPa), respectivamente. Sin embargo, son más cercanos a los valores presentados en los trabajos de Fakhreddin-Hosseini *et al.* (2013) para películas de gelatina (19.786 g*mm/m²*d*kPa) y gelatina con quitosano (9.85 g*mm/m²*d*kPa), Muñoz *et al.* (2012) para películas de mucílago de semilla de chía con proteína de suero concentrado (15.984 g*mm/m²*d*kPa), Ma *et al.* (2012) para películas con gelatina (48.384 g*mm/m²*d*kPa) y con los de. Murillo-Martínez *et al.* (2011) en películas de carboximetilcelulosa con pectina (38.40 g*mm/m²*d*kPa).

Por otra lado, la PVA para películas con cera de abeja en su formulación (con un valor promedio de 8.173 g*mm/m²*d*kPa) fue menor a los obtenidos por Ma *et al.* (2012) para películas de gelatina con aceite de oliva, con valores de 43.114 a 36.202 g*mm/m²*d*kPa, Navarro-Tarazaga *et al.* (2011) para películas de hidroxipropilmetilcelulosa con 20, 40 y 60% de cera de abeja (g/100g b.s.) con valores de 132.192, 108 y 79.68 g*mm/m²*d*kPa, respectivamente, Soazo *et al.* (2011) para películas con proteína de suero concentrado con

cera de abeja (74.39 a 81.562 g*mm/m²*d*kPa), Monedero *et al.* (2009) para películas a base de proteína de soya aislada con una fracción lipídica de ácido oleico y cera de abeja (95.904 g*mm/m²*d*kPa) y Fabra *et al.* (2008) para películas base de caseinato de sodio con cera de abeja y glicerol (62.381 g*mm/m²*d*kPa). Sin embargo, esta cercano a los valores presentados en los trabajos de Pires *et al.* (2013) para películas de proteína de merluza con aceite de tomillo (3.084 g*mm/m²*d*kPa), Ghasemlou *et al.* (2011) con películas de kefirán con ácido oleico (3.11 a 5.097 g*mm/m²*d*kPa) y Pires *et al.* (2011) que obtuvieron valores de 3.024 a 5.097 g*mm/m²*d*kPa con películas de proteína de merluza con aceite de tomillo.

De manera general la PVA de las películas fue afectada por la composición de las mismas, apreciándose de manera favorable cuando ésta se redujo al adicionar cera de abeja como uno de los componentes de las películas y percibiéndose de manera negativa cuando fueron elaboradas solo a partir de material hidrofílico (grenetina y/o mucílago de nopal) ocasionando que la PVA fuera más alta. Aunque cabe señalar que la distribución del material hidrofóbico (cera de abeja) también pudo ser un factor que afecto las propiedades de barrera de las mismas.

6.1.2.2. Permeabilidad a gases (O₂ y CO₂)

La permeabilidad a gases en películas comestibles, principalmente al oxígeno (PO₂) y dióxido de carbono (PCO₂), es una propiedad importante a evaluar debido a que está relacionado directamente con las velocidades de oxidación y/o respiración de los alimentos en los que se aplican estas películas, la mayoría de las veces como recubrimientos comestibles (Bourbon *et al.*, 2011). Además, el desarrollo de películas y recubrimientos comestibles con una permeabilidad selectiva a gases también contribuye a mejorar el control del intercambio respiratorio en tejidos vivos como las frutas y vegetales frescos y mínimamente procesados. Por lo tanto al darse una adecuada selección de una película o cubierta comestible con una permeabilidad apropiada se puede establecer un control en su intercambio respiratoria en estos productos y así mejorar su conservación (Lin y Zhao, 2007; Ayranci y Tunc, 2003).

Las películas elaboradas únicamente con hidrocoloides (mucílago de nopal y grenetina) presentaron 39.8 y 52.5% mayor permeabilidad a O₂ y CO₂, respectivamente, en comparación con aquellas adicionadas con cera de abeja, las cuales presentaron la menor permeabilidad (Figuras 14 y 15). Además, hubo una diferencia significativa ($p < 0.05$) en la permeabilidad a estos gases en todas las formulaciones evaluadas.

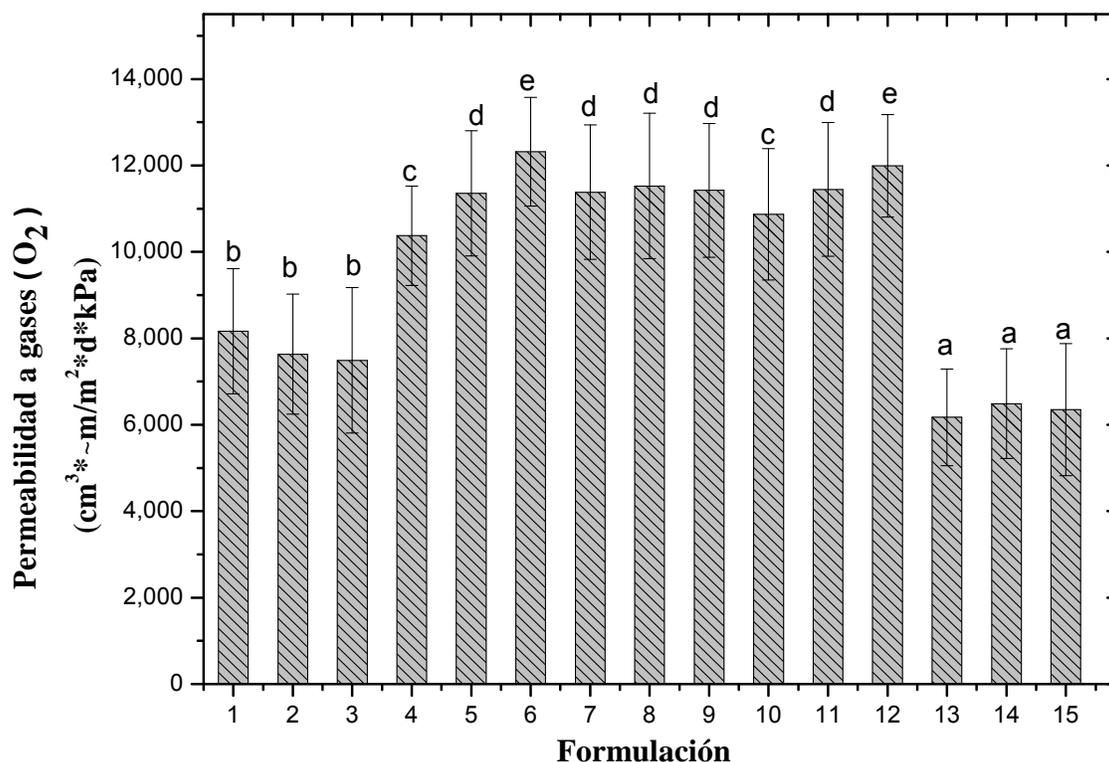


Figura 14. Permeabilidad al oxígeno (cm³·μm/m²·d·kPa) de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal. Los números en el eje de las Abscisas representan la formulación empleada para cada película comestible; 1 (G₁), 2 (G₂), 3 (G₃), 4 (M₁G₁), 5 (M₂G₁), 6 (M₃G₁), 7 (M₁G₂), 8 (M₂G₂), 9 (M₃G₂), 10 (M₁G₃), 11 (M₂G₃), 12 (M₃G₃), 13 (M₁G₁C₁), 14 (M₃G₁C₁), 15 (M₁G₁C₂). M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja y 1=0.5%, 2=1%, 3=1.5%. Las barras verticales representan la media de 6 películas ± SD. Diferentes letras indican diferencia significativa (P < 0.05).

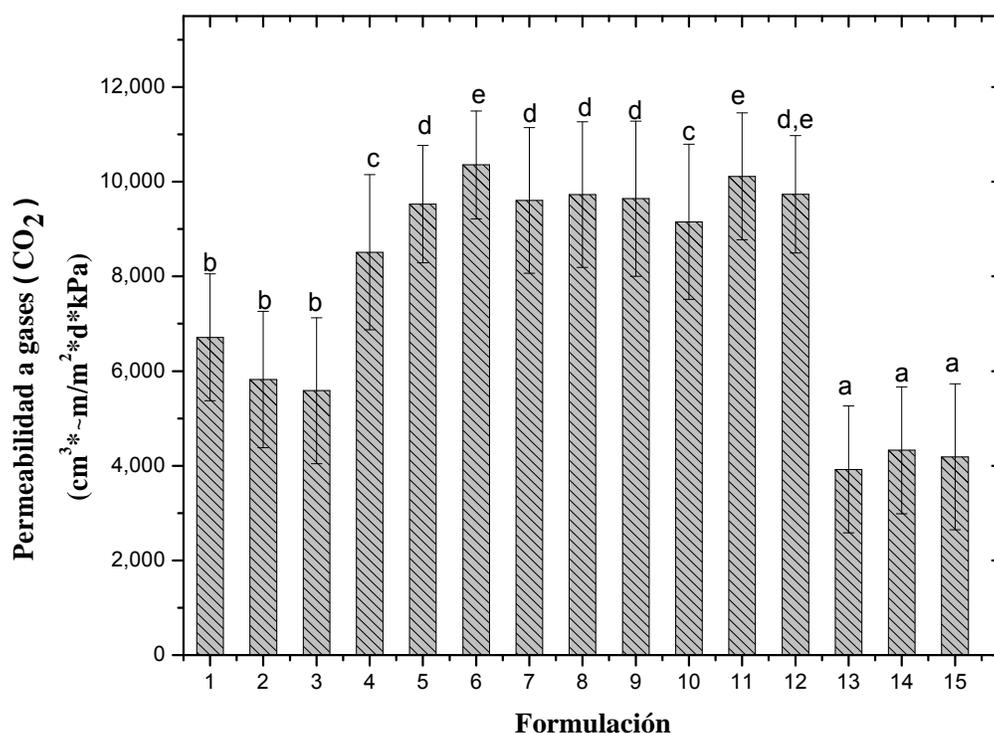


Figura 15. Permeabilidad al dióxido de carbono ($\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m} / \text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$) de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal. Los números en el eje de las Abscisas representan la formulación empleada para cada película comestible; 1 (G_1), 2 (G_2), 3 (G_3), 4 (M_1G_1), 5 (M_2G_1), 6 (M_3G_1), 7 (M_1G_2), 8 (M_2G_2), 9 (M_3G_2), 10 (M_1G_3), 11 (M_2G_3), 12 (M_3G_3), 13 ($M_1G_1C_1$), 14 ($M_3G_1C_1$), 15 ($M_1G_1C_2$). M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja y 1=0.5%, 2=1%, 3=1.5 %. Las barras verticales representan la media de 6 películas \pm SD. Diferentes letras indican diferencia significativa (P 0.05).

En películas únicamente elaboradas con hidrocoloides, la PO_2 y PCO_2 aumentó con el incremento en la concentración del mucílago de nopal, siendo este componente el que mayor influencia tuvo en la variación de la permeabilidad a gases. Las películas con 1.5% de mucílago de nopal y 0.5% de grenetina en su formulación (F-6) fueron las que presentaron los valores más altos de permeabilidad al O_2 y CO_2 , con valores de 12317.944 y 10356.541 $\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m} / \text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$, respectivamente, en comparación con aquellas elaboradas con 0.5% de mucílago y 0.5% de grenetina (F-4) que presentaron los valores más bajos (10373.055 y 8511.194 $\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m} / \text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$, respectivamente). El aumento de la PO_2 y PCO_2 al aumentar el contenido de mucílago de nopal podría estar relacionado con la naturaleza hidrofílica de este componente, el cual tienen una gran capacidad de retención de agua (Saenz *et al*, 2004), lo que causa un aumento del contenido de la misma en la matriz polimérica ocasionando una mayor solubilidad del O_2 y CO_2 en las PC (Gontard *et al.*,

1996), además de que se ha reportado que las PC a base de gelatina presentan una excelente barrera al O₂ y CO₂ debido a su comprimida y ordenada red estructural (Wang *et al.*, 2011).

Por otro lado, los resultados muestran que la adición de cera de abeja influyó en la disminución de la permeabilidad al O₂ y CO₂ en las películas comestibles, pues fueron éstas las que de manera general presentaron la menor permeabilidad, siendo las elaboradas con 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina y 0.5% de cera de abeja (F-13) las que presentaron los valores más bajos (6173.098 y 3923.159 cm³*µm/m²*d*kPa para O₂ y CO₂, respectivamente). La capacidad de las películas con cera de abeja para resistir el paso del oxígeno de una manera más efectiva que aquellas sin este componente podría estar relacionado con el aumento del espesor que éstas presentan al adicionar la cera de abeja (el espesor promedio de películas con mucílago de nopal y grenetina fue de 0.131 y de 0.160 mm para aquellas con cera de abeja), además de sus diferencias estructurales las cuales fueron analizadas por microscopia electrónica de barrido y en donde las películas con tres componentes fueron las que presentaron menores grietas y aunque presentaron una apariencia más rugosa, su estructura fue más cerrada y compacta, factor que también podría haber contribuido a una menor difusión de los gases. Asimismo, Gontard *et al.* (1996) reportaron que la disminución de la permeabilidad en películas adicionadas con lípidos puede estar relacionado a la característica hidrofóbica de estos componentes, los cuales reducen el contenido de agua en películas, lo que ocasiona una disminución en la solubilidad del O₂ y CO₂ en las mismas, comparadas con aquellas sin componentes hidrofóbicos y a las mismas condiciones de humedad relativa. Los resultados anteriores son similares a los reportados por Gontard *et al.* (1996) que obtuvieron una menor permeabilidad al oxígeno en películas de gluten de trigo con cera de abeja que aquellas sin este componente, por Greener y Fennema (1989) en películas de metilcelulosa con cera de abeja en comparación con aquellas sin cera de abeja y por Park y Chinnan (1995) que reportaron que la adición de lípidos en películas a base de hidroxipropilcelulosa contribuyó a disminuir la PO₂ y PCO₂ de las mismas. Sin embargo, se contraponen a los reportados por Navarro-Tarazaga *et al.* (2011), en donde las películas con HPMC son las que presentan la menor permeabilidad a gases comparado con aquellas adicionadas con cera de abeja las cuales presentaron un aumento en la PO₂.

Los resultados en películas con cera de abeja encontrados en el presente trabajo son más cercanos a los valores de permeabilidad a gases que reportaron Bourbon *et al.* (2011) y Gontard *et al.* (1996) en películas de quitosano y de gluten de trigo con cera de abeja ($PO_2=3356.033$ y 1421.608 y $PCO_2=4624.882$ y 9897.06 $cm^3*\mu m/m^2*d*kPa$, respectivamente). Aunque están un orden de magnitud por arriba de los valores de PO_2 (232-337 y 427 $cm^3*\mu m/m^2*d*kPa$) reportados por Navarro-Tarazaga *et al.* (2011) y Miller y Krochta (1997) para películas a base de hidroxipropilmetilcelulosa sin y con cera de abeja y para el Polietileno de alta densidad, respectivamente. La similitud o desacuerdo con otros trabajos podría deberse principalmente a que la permeabilidad a gases se ve afectada de manera muy significativa por la especificidad en la formulación de cada película evaluada en cada trabajo presentado.

6.1.3. Propiedades mecánicas

- **Esfuerzo de fractura en extensión**

En la figura 16 se observa como el esfuerzo de tensión aumenta con el incremento en la concentración de grenetina en películas elaboradas únicamente con este componente. Asimismo, en películas elaboradas con dos componentes puede observarse que a medida que aumenta la cantidad grenetina, combinado con un incremento en el porcentaje de mucílago de nopal, el esfuerzo de fractura en extensión también va en aumento. Finalmente, también puede observarse la disminución en el esfuerzo de fractura de tensión en películas con tres componentes debido a la adición de cera de abeja.

Por otro lado, las películas con cera de abeja presentaron, en promedio, 84.6% menor esfuerzo de fractura en la extensión, en comparación con aquellas elaboradas únicamente con hidrocoloides, presentándose una diferencia significativa entre estos grupos ($p < 0.05$), con la excepción de las elaboradas de 0.5% de grenetina con y sin mucílago de nopal (F-1, F-4, F-5 y F-6), las cuales no presentaron una diferencia significativa ($p > 0.05$) con respecto a las elaboradas con cera de abeja.

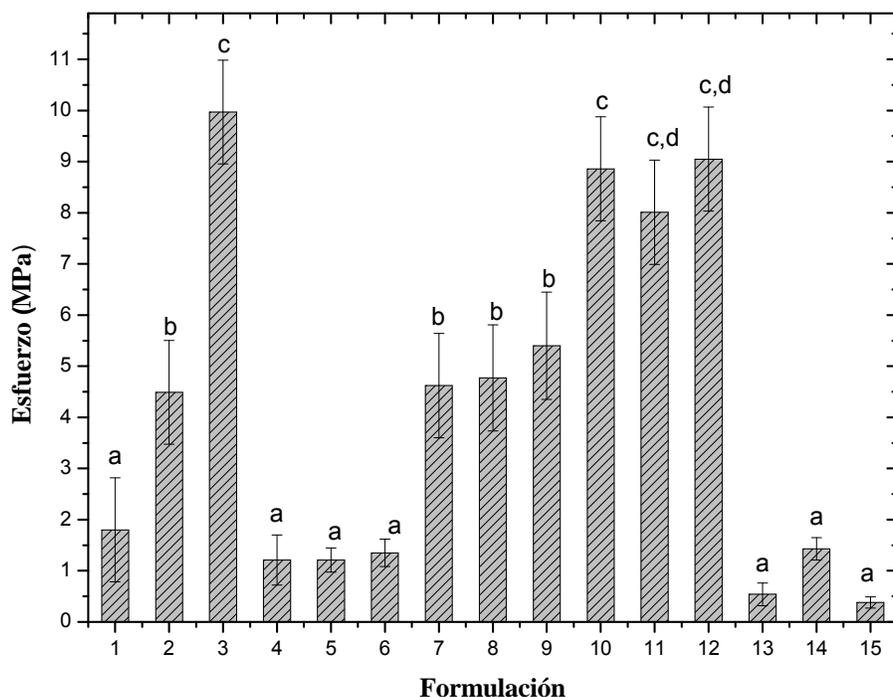


Figura 16. Fuerza de fractura en la Extensión (MPa) de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal. Los números en el eje de las Abscisas representan la formulación empleada para cada película comestible; 1 (G₁), 2 (G₂), 3 (G₃), 4 (M₁G₁), 5 (M₂G₁), 6 (M₃G₁), 7 (M₁G₂), 8 (M₂G₂), 9 (M₃G₂), 10 (M₁G₃), 11 (M₂G₃), 12 (M₃G₃), 13 (M₁G₁C₁), 14 (M₃G₁C₁), 15 (M₁G₁C₂). M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja y 1=0.5%, 2=1%, 3=1.5 %. Las barras verticales representan la media de 6 películas ± SD. Diferentes letras indican diferencia significativa (P 0.05).

En películas elaboradas únicamente con hidrocoloides, aquellas con una concentración de 1.5% de grenetina con 0.5, 1 y 1.5% de mucílago de nopal (F-10,11 y 12), las cuales no presentaron diferencia significativa ($p < 0.05$), requirieron 85.5% mayor esfuerzo para su ruptura (8.01-9.05 MPa), en comparación con las elaboradas con 0.5% de grenetina y 0.5, 1 y 1.5% de mucílago (F-4, 5 y 6), las cuales son las películas que necesitan el menor esfuerzo (1.21-1.35 MPa). Asimismo, las películas elaboradas de 1% de grenetina con 0.5, 1 y 1.5% de mucílago presentaron un esfuerzo medio (4.62-5.40 MPa), en comparación con los esfuerzos mínimos y máximos, antes mencionados. Por lo tanto, el aumento en la concentración de grenetina en las películas influyó claramente en el incremento en el esfuerzo de tensión de las mismas, resultando películas más fuertes, lo que podría deberse a que la grenetina incrementa el número de cadenas superficiales poliméricas, las cuales son las responsables de mejorar las interacciones intermoleculares dentro de la matriz polimérica, lo que genera una mayor resistencia a la tensión (Fakhoury *et al.*, 2012).

Estos resultados coinciden con lo descrito por Coughlan *et al.* (2004) que mencionan que las mezclas de proteína/polisacárido presentan propiedades funcionales más efectivas que las proteínas y los polisacáridos solos. Asimismo, Turgeon y Beaulieu (2001); Zaleska *et al.* (2000); Schmitt *et al.* (1999) y Parris *et al.* (1995) citados por Coughlan *et al.* (2004) reportaron que las películas formadas de mezclas de proteínas y polisacáridos presentan un mayor esfuerzo de tensión que las formadas únicamente con proteínas o polisacáridos.

Por otro lado, como ya se mencionó, las películas con cera abeja presentaron 84.6% menor esfuerzo de tensión ($0.78 \text{ MPa}_{\text{promedio}}$), en comparación con aquellas elaboradas únicamente con hidrocoloides ($5.06 \text{ MPa}_{\text{promedio}}$), por lo que fueron las que mostraron el menor esfuerzo de todas las películas obtenidas. Y dentro de este grupo, las elaboradas con 0.5% mucílago de nopal con 1 % cera de abeja y 0.5% grenetina (F-15) requieren el menor esfuerzo para su ruptura (0.38 MPa), en comparación con las constituidas por 1.5% mucílago de nopal, 0.5% cera de abeja y 0.5% grenetina (F-14) las cuales presentaron el mayor esfuerzo (1.43 MPa). Asimismo, las películas constituidas por 0.5% mucílago de nopal con 0.5% cera de abeja y 0.5% grenetina (F-13) presentaron un esfuerzo medio (0.54 MPa), en comparación con los esfuerzos mínimos y máximos, antes mencionados. Lo anterior, indica que la adición y aumento del contenido de cera de abeja da lugar a películas y recubrimientos menos resistentes, sin embargo, también puede observarse que el aumento en la concentración de mucílago de nopal en películas con cera de abeja ayuda a aumentar el esfuerzo de tensión en las mismas.

Varios autores (Navarro-Tarazaga *et al.*, 2008; Pérez-Gago y Krochta, 2001; Shellhamer y Krochta, 1997; Gontard y Guilbert, 1994) mencionan que la adición de lípidos como las ceras, en películas a base de hidrocoloides producen una estructura heterogénea debido a que las moléculas del lípido que están dispersas en la matriz del hidrocoloide interrumpen la continuidad de la matriz polimérica, produciendo puntos de fractura que reducen la resistencia de las películas a la tracción, a la punción y una modificación de las propiedades mecánicas en general. Estas discontinuidades y la baja cohesividad estructural de los lípidos, además de su fracturabilidad pueden aumentar la fragilidad de las películas, disminuyendo el esfuerzo de tensión y punción en ellas.

Además, Talens y Krochta (2005) y Maftoonazad *et al.* (2007) mencionan que lípidos como la cera de abeja presenta mayor rigidez y resistencia a la deformación debido a que presenta un alto punto de fusión (61-65 °C) y por lo tanto, las gotas que forman la fase dispersa en la matriz polimérica se encuentran en estado sólido, ocasionando que esta fase se torne muy rígida, lo que provoca que no puedan ser deformadas fácilmente, reduciendo así su capacidad para la extensión. Lo anterior ocasiona que su adición a películas a base de hidrocoloides genere materiales poco dúctiles, rígidos y menos adaptables al fruto, debido a que presentan una baja cohesividad estructural y son fácilmente fracturables.

Asimismo, se ha observado que en películas emulsionadas con hidrocoloides y lípidos existe un menor contenido de agua en las mismas, además de valores más bajos en sus propiedades mecánicas, en comparación con las formadas únicamente con hidrocoloides. Esto puede deberse a que la incorporación de lípidos, además de crear discontinuidades, también aumenta la hidrofobicidad de las películas reduciendo su capacidad de adsorción de agua y con ello el papel de plastificante que tiene en la formulación (Navarro-Tarazaga *et al.*, 2008; Quezada-Gallo *et al.*, 2000). La gran resistencia de la cera de abeja al agua está relacionado con su alta hidrofobicidad (alto contenido de alcoholes grasos y alcanos de cadena larga) y con su organización molecular, ya que las ceras presentan un arreglo cristalina ortorrómbico fuertemente compacto que es perpendicular al flujo del agua, dificultando o impidiendo su paso (Fabra *et al.*, 2008).

Por otro lado, Espino-Díaz *et al.* (2010) mencionan que algunos estudios han mostrado que las propiedades mecánicas de PC podrían depender de otros factores como el peso molecular de los componentes. Park *et al.* (1993) reportaron que las propiedades mecánicas de PC de celulosa fueron afectadas por el peso molecular, mostrando un incremento en el esfuerzo de tensión conforme aumenta el peso molecular. Iguales resultados fueron reportados por Lazaridou *et al.* (2003) en películas de pululan. En base a lo anterior, la diferencia en pesos moleculares que presentan la cera de abeja, la cual es un compuesto de menor peso molecular con respecto a los polisacáridos y proteínas, las cuales son macromoléculas y presentan altos pesos moleculares, podría ser un factor secundario que afecta las propiedades mecánicas de las PC, siendo la cera de abeja el compuesto que tiene mayor influencia en la disminución de estas propiedades.

Finalmente, comparando los resultados obtenidos en este trabajo se puede observar que los valores obtenidos para las películas con el mayor esfuerzo de tensión (8.01-9.05 MPa), fueron cercanos en orden a los presentados por Fakhreddin-Hosseini *et al.* (2013) para mezclas de gelatina con quitosano (7.35-16.60 MPa), Ma *et al.* (2012) que reportan valores de 6.10-10.89 MPa para películas a base de gelatina adicionada con aceite de oliva, Pereda *et al.* (2012) con valores de 8.41-14.69 MPa para emulsiones de quitosano con aceite de oliva y Navarro-Tarazaga *et al.* (2011) en películas de hidroxipropilmetilcelulosa con cera de abeja (3-7 MPa), aunque menores a los obtenidos por Limpisophon *et al.* (2010) con valores que van de 9.46 a 23.26 MPa para gelatina con ácido oleico.

Por otro lado los valores reportados es este trabajo para películas con 1% de grenetina con 0.5, 1 y 1.5% de mucílago (4.62-5.40 MPa) son similares a los obtenidos por Pires *et al.* (2013) con películas de proteína de merluza con aceite de tomillo (4.33 MPa), Muñoz *et al.* (2012) utilizando mucílago de chía con proteína de suero y glicerol (2.67-3.79 MPa), Soazo *et al.* (2011) con emulsiones de proteína de suero con cera de abeja (1.646-3.315 MPa), Monedero *et al.* (2009) para proteína de soya con ácido oleico y cera de abeja (1.5-4.5 MPa) y Fabra *et al.* (2008) en caseinato de sodio con ácido oleico y cera de abeja (2.8-3.2 MPa), los cuales son mayores a los valores obtenidos en el presente trabajo para películas con 0.5% de grenetina con 0.5, 1 y 1.5% de mucílago (1.21-1.35 MPa) y para las elaboradas con mucílago de nopal, grenetina y cera de abeja (0.38-1.43 MPa). Sin embargo, los resultados anteriores están más cercanos a los reportados por Al-Hassan y Norziah (2012) en películas de almidón y gelatina (1.28-1.67 MPa), Murillo-Martínez *et al.* (2011) para carboximetilcelulosa con proteína de suero y pectina de bajo metoxilo con proteína de suero (0.93 y 1.49 MPa), respectivamente, y Espino-Díaz *et al.* (2010) para películas de mucílago de nopal con y sin calcio (0.4-0.95 y 0.30-0.50 MPa), respectivamente.

- **Esfuerzo de fractura en la punción**

En la figura 17 se observa como el esfuerzo de punción aumenta con el incremento en la concentración de grenetina en películas elaboradas únicamente con este componente. Asimismo, en películas elaboradas con dos componentes puede observarse que a medida

que aumenta la cantidad de mucílago de nopal, combinado con un incremento en el porcentaje de grenetina, el esfuerzo de fractura en punción también va en aumento. Finalmente, en la figura puede observarse la disminución en el esfuerzo de fractura en películas con tres componentes debido a la adición de cera de abeja.

Las películas con cera de abeja en su formulación fueron las que, en promedio, presentaron 86.2% menor esfuerzo de fractura, en comparación con aquellas elaboradas únicamente con hidrocoloides, aunque no existió una diferencia significativa ($p < 0.05$) con las películas elaboradas con el menor porcentaje de grenetina con mucílago de nopal (F-4 y F-5) y sin el mismo (F-1 y F-2).

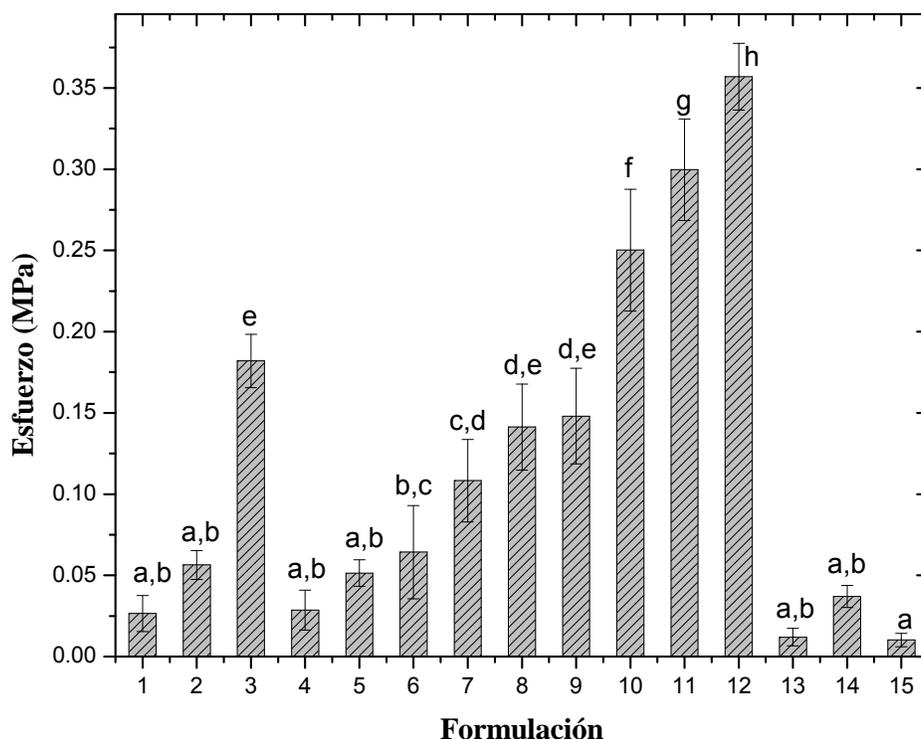


Figura 17. Fuerza de fractura en la Punción (MPa) de diferentes películas comestibles a base de mucílago de nopal. Los números en el eje de las Abscisas representan la formulación empleada para cada película comestible; 1 (G₁), 2 (G₂), 3 (G₃), 4 (M₁G₁), 5 (M₂G₁), 6 (M₃G₁), 7 (M₁G₂), 8 (M₂G₂), 9 (M₃G₂), 10 (M₁G₃), 11 (M₂G₃), 12 (M₃G₃), 13 (M₁G₁C₁), 14 (M₃G₁C₁), 15 (M₁G₁C₂). M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja y 1=0.5%, 2=1%, 3=1.5%. Las barras verticales representan la media de 6 películas \pm SD. Diferentes letras indican diferencia significativa (P < 0.05).

En películas elaboradas únicamente con hidrocoloides, las películas de 1.5% de grenetina con 0.5, 1 y 1.5% de mucílago fueron estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) y requirieron,

en promedio, 84% mayor esfuerzo para su ruptura (0.250-0.357 MPa) en comparación con aquellas elaboradas de 0.5% de grenetina con 0.5, 1 y 1.5% de mucílago, las cuales necesitaron el menor esfuerzo (0.029-0.064 MPa). Asimismo, las películas elaboradas de 1% de grenetina con 0.5, 1 y 1.5% de mucílago de nopal presentaron un esfuerzo medio (0.108-0.148 MPa) en comparación con los esfuerzos mínimos y máximos antes mencionados. Por lo tanto, el aumento en la concentración de grenetina y mucílago de nopal en las películas muestra claramente su influencia en el incremento en el esfuerzo de punción de las mismas, resultando en películas más fuertes, debido principalmente a que el aumento en la concentración de hidrocoloides podría ayudar a aumentar su interacción y a la formación de una red estructural más resistente, además los polisacáridos y proteínas pueden proveer interacciones adicionales de enlaces de hidrógeno entre las cadenas poliméricas, resultando en una película más resistente (Wang *et al.*, 2011).

Los resultados obtenidos en este trabajo coinciden con lo descrito por Coughlan *et al.* (2004) que mencionan que las mezclas de proteína/polisacárido presentan propiedades funcionales más efectivas que las proteínas y los polisacáridos solos. Además de que Turgeon y Beaulieu (2001), Zaleska *et al.* (2000), Schmitt *et al.* (1999) y Parris *et al.* (1995) citados por Coughlan *et al.* (2004) reportaron que las películas formadas de mezclas de proteínas y polisacáridos presentan un mayor esfuerzo de tensión que las formadas sólo con proteínas o polisacáridos.

Por otro lado, de todas las películas obtenidas, las elaboradas con cera abeja (las cuales no presentaron diferencia significativa, ($p > 0.05$)) registraron 86.2% menor esfuerzo de punción ($0.020 \text{ MPa}_{\text{promedio}}$) en comparación con aquellas elaboradas únicamente con hidrocoloides (0.143 MPa), siendo las elaboradas de 0.5% mucílago de nopal con 1% cera de abeja y 0.5% grenetina (F-15) las que requirieron el menor esfuerzo para su ruptura (0.010 MPa) en comparación con las constituidas por 1.5% mucílago de nopal, 0.5 % cera de abeja y 0.5% grenetina (F-14), las cuales presentaron el mayor esfuerzo (0.037 MPa), Asimismo, las películas constituidas por 0.5% de mucílago de nopal con 0.5% de grenetina y 0.5% de cera de abeja (F-13) presentaron un esfuerzo medio, en comparación con los esfuerzos mínimos y máximos antes mencionados. Lo anterior, indica que la adición y aumento del contenido de cera de abeja da lugar a películas menos resistentes.

Como ya se ha mencionado anteriormente, algunos autores (Navarro-Tarazaga *et al.*, 2008; Pérez-Gago y Krochta, 2001; Shellhamer y Krochta, 1997; Gontard y Guilbert, 1994) han reportado que la adición de lípidos como las ceras, en películas a base de hidrocoloides producen una estructura heterogénea debido a que las moléculas del lípido que están dispersas en la matriz del hidrocoloide interrumpen la continuidad de la matriz polimérica, produciendo puntos de fractura que reducen la resistencia de las películas a la tracción, a la punción y una modificación de las propiedades mecánicas en general. Además, Talens y Krochta (2005) y Maftoonazad *et al.* (2007) mencionaron que la cera de abeja presenta mayor rigidez y resistencia a la deformación debido a que presenta un alto punto de fusión (61-65 °C) y por lo tanto, las gotas que forman la fase dispersa en la matriz polimérica se encuentran en estado sólido, provocando que esta fase se vuelva muy rígida, lo que ocasiona que no puedan ser deformadas fácilmente. Lo anterior ocasiona que su adición a películas a base de hidrocoloides genere materiales poco dúctiles, rígidos y menos adaptables al fruto, debido a que presentan una baja cohesividad estructural y son fácilmente fracturables.

Asimismo, ya se ha mencionado que en películas emulsionadas con hidrocoloides y lípidos existe un menor contenido de agua en las mismas, además de valores más bajos en sus propiedades mecánicas, en comparación con las formadas únicamente con hidrocoloides. Esto puede deberse a que la incorporación de lípidos, además de crear discontinuidades, también aumenta la hidrofobicidad de las películas reduciendo su capacidad de adsorción de agua y con ello el papel de plastificante que tiene en la formulación (Navarro-Tarazaga *et al.*, 2008; Quezada-Gallo *et al.*, 2000). La gran resistencia de la cera de abeja al agua está relacionado con su alta hidrofobicidad (alto contenido de alcoholes grasos y alcanos de cadena larga) y con su organización molecular, ya que las ceras presentan un arreglo cristalina ortorrómbico fuertemente compacto que es perpendicular al flujo del agua, dificultando o impidiendo su paso (Fabra *et al.*, 2008).

Finalmente, comparando los resultados obtenidos en este trabajo se puede observar que los valores obtenidos para las películas con el mayor esfuerzo de punción (0.250-0.357 MPa) son similares a los obtenidos por Soazo *et al.* (2011) que reportan valores de 0.178-0.243 MPa para películas de proteína de suero con cera de abeja. Los valores anteriores son

ligeramente mayores a los reportados en este trabajo para películas con 1% de grenetina con 0.5, 1 y 1.5% de mucílago (0.108-0.148 MPa). Por otro lado, los trabajos realizados por Pires *et al.* (2013) y Muñoz *et al.* (2012) reportan valores de esfuerzo de punción de 0.467 MPa y 0.643-0.552 MPa para películas de proteína de merluza con aceite de tomillo y mucílago de chíá con proteína de suero y glicerol, respectivamente, los cuales son mucho mayores a los reportados por este trabajo.

De manera general, las películas elaboradas con tres componentes (grenetina, mucílago de nopal y cera de abeja) fueron las que mostraron una disminución en sus propiedades mecánicas, pues como ya se ha mencionado, la adición y el incremento del contenido de lípidos disminuye estas propiedades en películas a base de hidrocoloides, aunque por otro lado favorece sus propiedades de barrera, como se pudo comprobar en los resultados obtenidos para WVP.

Finalmente en el apéndice B, se muestran los resultados en conjunto de las propiedades físicas, de barrera y mecánicas de todas las PC evaluadas en este trabajo.

6.1.4. Estructura Microscópica

El estudio estructural de las películas comestibles ayuda a obtener información acerca del arreglo de los componentes, permitiendo un mejor entendimiento de las propiedades de barrera y mecánicas de las mismas, principalmente.

El análisis realizado por microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) de las diferentes películas elaboradas mostró algunas diferencias en su superficie y en la morfología de su estructura interna (figura 18). Las microfotografías obtenidas muestran el efecto de la incorporación de más de un componente y de la adición de cera de abeja en la micro estructura de las películas.

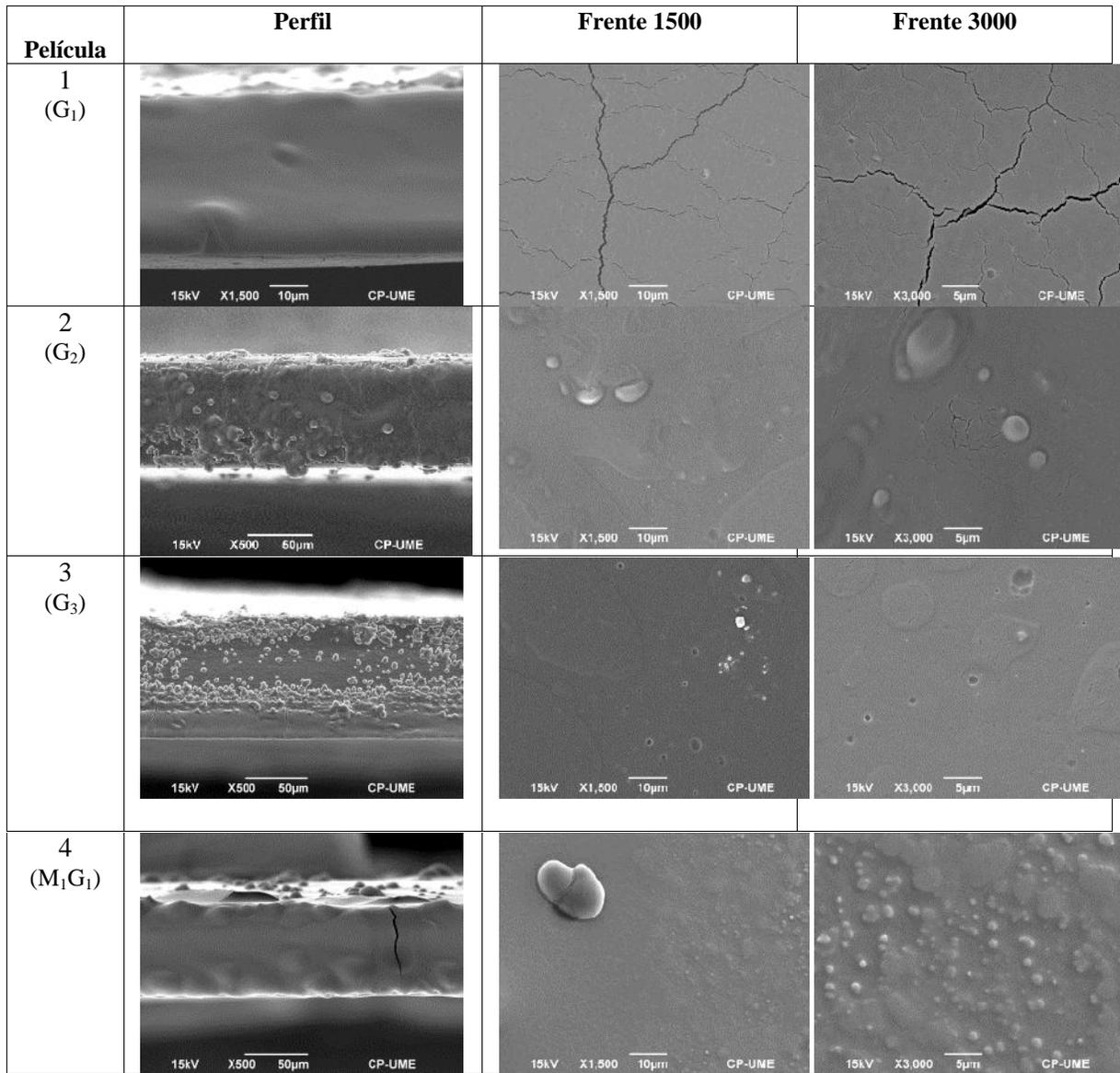


Figura 18. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de diferentes películas elaboradas a base de mucílago de nopal en su sección transversal y dos tomas superficiales de 1500x y 3000x. Los números representan la formulación empleada para cada película comestible; 1 (G₁), 2 (G₂), 3 (G₃), 4 (M₁G₁), 5 (M₂G₁), 6 (M₃G₁), 7 (M₁G₂), 8 (M₂G₂), 9 (M₃G₂), 10 (M₁G₃), 11 (M₂G₃), 12 (M₃G₃), 13 (M₁G₁C₁), 14 (M₂G₁C₁), 15 (M₁G₁C₂). M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja y 1=0.5%, 2=1%, 3=1.5 %.

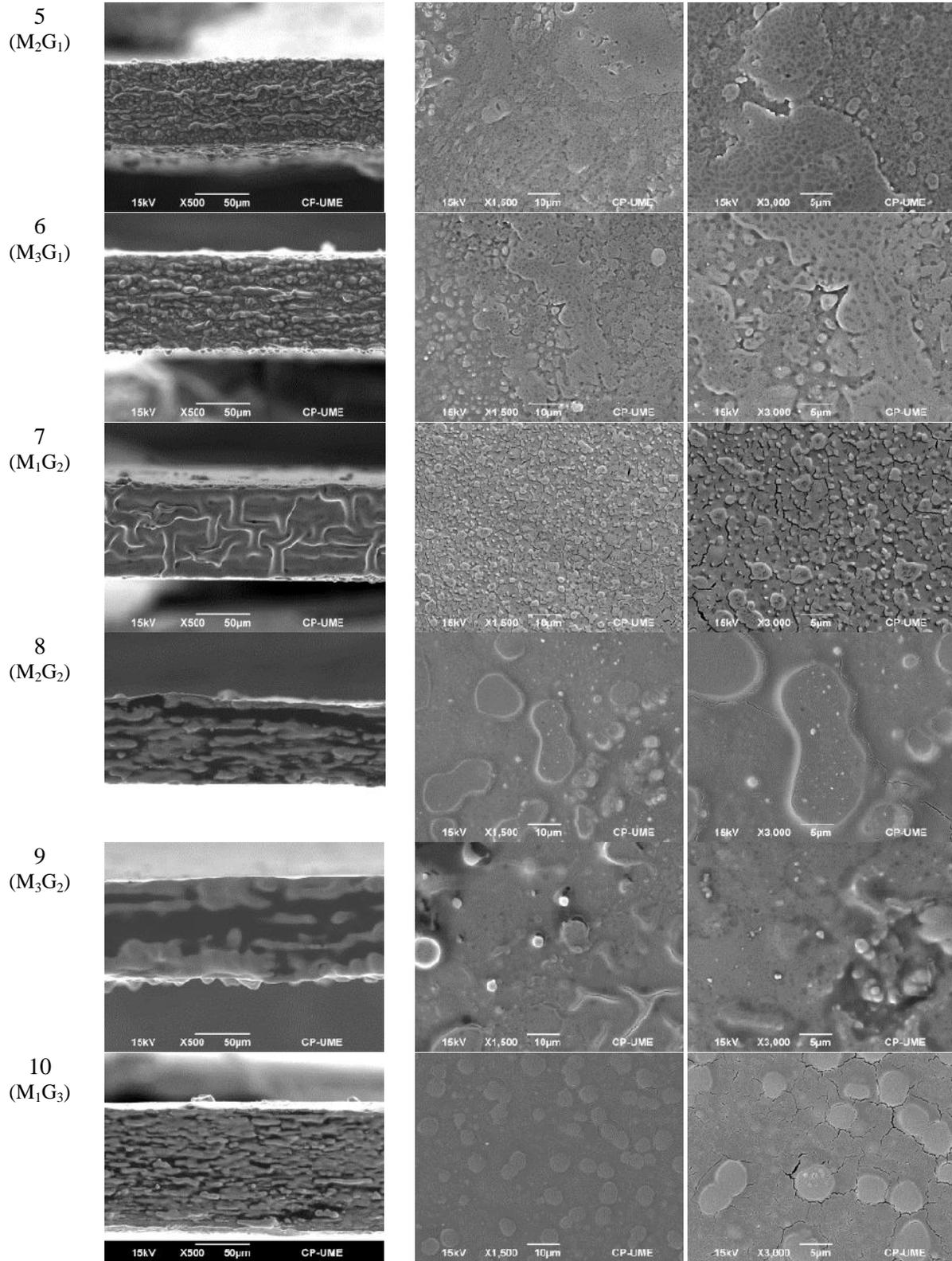


Figura 18. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de diferentes películas elaboradas a base de mucílago de nopal en su sección transversal y dos tomas superficiales de 1500x y 3000x. Los números representan la formulación empleada para cada película comestible; 1 (G₁), 2 (G₂), 3 (G₃), 4 (M₁G₁), 5 (M₂G₁), 6 (M₃G₁), 7 (M₁G₂), 8 (M₂G₂), 9 (M₃G₂), 10 (M₁G₃), 11 (M₂G₃), 12 (M₃G₃), 13 (M₁G₁C₁), 14 (M₃G₁C₁), 15 (M₁G₁C₂). M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja y 1=0.5%, 2=1%, 3=1.5 % (continuación).

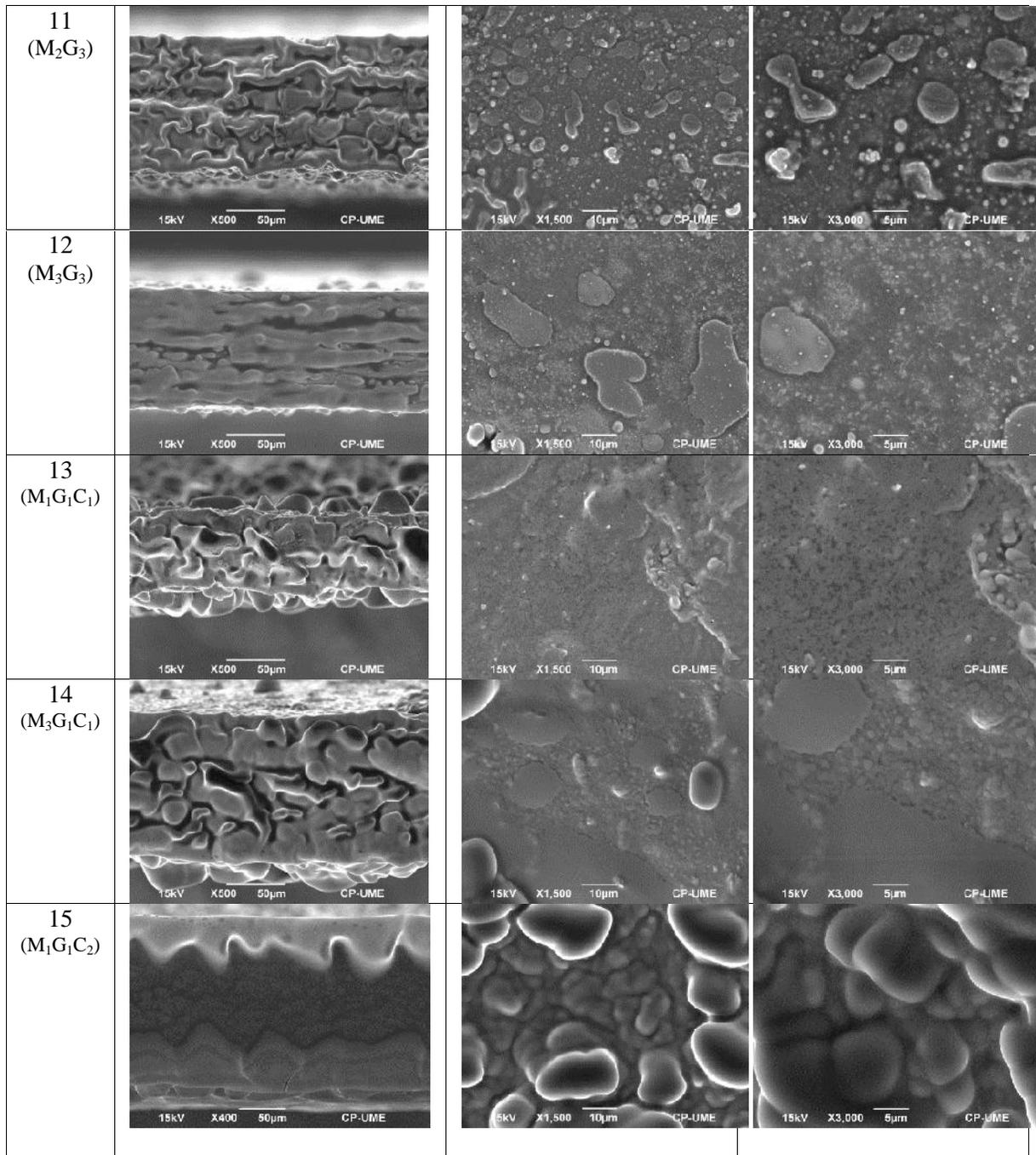


Figura 18. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de diferentes películas elaboradas a base de mucílago de nopal en su sección transversal y dos tomas superficiales de 1500x y 3000x. Los números representan la formulación empleada para cada película comestible; 1 (G₁), 2 (G₂), 3 (G₃), 4 (M₁G₁), 5 (M₂G₁), 6 (M₃G₁), 7 (M₁G₂), 8 (M₂G₂), 9 (M₃G₂), 10 (M₁G₃), 11 (M₂G₃), 12 (M₃G₃), 13 (M₁G₁C₁), 14 (M₃G₁C₁), 15 (M₁G₁C₂). M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja y 1=0.5%, 2=1%, 3=1.5% (continuación).

Las películas elaboradas con un sólo componente y sin la adición de cera de abeja mostraron una estructura relativamente más suave y homogénea, seguidas de las elaboradas de dos componentes. Sin embargo, las películas adicionadas con cera de abeja presentaron una apariencia más rugosa en su superficie probablemente ocasionado por un fenómeno de coalescencia y cremado durante el proceso de formación (secado principalmente) de la película, lo que produjo la migración de las gotas del lípido a la superficie de la misma, incrementando así su rugosidad (Zuñiga *et al.*, 2012), del mismo modo Fabra *et al.* (2009) y Villalobos *et al.* (2005) han mencionado que la formación de gotas lipídicas y su desarrollo durante el secado de las películas supone la interrupción de la matriz del hidrocoloide incrementando la rugosidad de la superficie de las mismas. El incremento de la rugosidad es debido principalmente a fenómenos de coalescencia y cremado, los cuales ocurren durante el secado de las películas. Además, Fabra *et al.* (2009) observaron que a medida que se incrementa el contenido de cera de abeja en películas a base de caseinato de sodio se incrementa la rugosidad de las mismas, lo cual se explica por el mayor tamaño de las gotas de cera de abeja, debido probablemente a su alto punto de fusión, lo que aumenta los fenómenos de desestabilización durante el secado de las películas y una gran acumulación de agregados lipídicos en la superficie de las mismas.

La mayoría de las películas mostraron alguna presencia de cavidades y/o grietas que podrían estar relacionados con la formación de canales en las películas y que podrían afectar en las propiedades de barrera y mecánicas. Asimismo en la mayoría de las películas elaboradas con dos componentes se presentó la presencia de algunas partículas en forma granular en su superficie que probablemente son de agregados de mucilago de nopal que no fueron bien disueltos durante el proceso de preparación de las PC y que al presentarse la pérdida de agua por evaporación durante el secado de las mismas provocó que estas partículas se depositaran en la superficie (Muñoz *et al.*, 2012; Murillo-Martínez *et al.*, 2011).

Las películas con tres componentes fueron las que mostraron menores grietas y aunque presentaron una apariencia más rugosa, su estructura fue más cerrada y compacta. Las películas de grenetina fueron las que presentaron una estructura más lisa, homogénea, aunque no más compacta, y con menor rugosidad. Además, cabe señalar que un mayor

acercamiento a su estructura permitió observar la presencia de grietas, que se puede atribuir al proceso de secado de las mismas (De Carvalho y Grosso, 2004).

Con respecto a la sección transversal se observó que hubo mayor espesor en las películas con tres componentes (mucílago de nopal con cera de abeja y grenetina), seguidas de las películas de dos y un solo componente. Asimismo a medida que aumentaba la concentración de mucílago de nopal, grenetina y cera de abeja el grosor de las películas fue aumentando.

Las películas de mucílago de nopal con grenetina y cera de abeja aunque fueron las más rugosas presentaron una estructura más cerrada y con menor presencia de cavidades y grietas, siendo las elaboradas con 0.5% de grenetina, 0.5% de mucílago de nopal y 0.5% de cera de abeja (F-13) las que presentaron la estructura más continua, homogénea y con mínimos defectos superficiales, habiendo sido estas mismas las que presentaron la menor permeabilidad a la humedad, indicador de buenas propiedades de barrera, confirmando así la estrecha relación que existe entre la permeabilidad al vapor de agua y la micro estructura de las películas.

La SEM reveló que la estructura de las películas de grenetina y mucílago de nopal con grenetina fue relativamente comparable con los trabajos presentados por Muñoz *et al.* (2012) utilizando mucílago de *Salvia hispánica* y proteína de suero, Ma *et al.* (2012) manejando gelatina con aceite de oliva, Ghasemlou *et al.* (2011) en mezclas de kefirán sin ácido oleico, Al-Hassan y Norziah (2012) en películas de almidón y gelatina, Andreuccetti *et al.* (2011) para gelatina con extracto de yuca o lecitina y Limpisophon *et al.* (2010) en películas de gelatina con ácido oleico. Por otro lado, la estructura de las películas elaboradas con mucílago de nopal, grenetina y cera de abeja, las cuales presentaron mayor rugosidad, fueron relativamente comparables con los trabajos presentados por Zúñiga *et al.* (2012) en películas con hidroxipropilmetilcelulosa con aceite de girasol y Fabra *et al.* (2009) para caseinato de sodio con cera de abeja y ácido oleico.

Uno de los principales objetivos que se busca en la aplicación de RC en frutas es reducir la tasa de respiración y transpiración en las mismas y con ello mantener la calidad y aumentar la vida útil del fruto, por lo que se busca que los recubrimientos aplicados presenten buenas propiedades al vapor de agua y a gases (O_2 y CO_2). Por lo tanto, de acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización de las películas, de todas las films obtenidas, las elaboradas a base de 0.5 % mucílago de nopal con 0.5% de grenetina y 0.5% de cera de abeja (F-13) fueron los que presentaron los mejores resultados en PVA y a gases, además de obtener resultados aceptables en los parámetros de luminosidad, espesor y estructura microscópica, por lo que fueron las seleccionadas para ser aplicadas como RC en la conservación de la calidad poscosecha de ciruelas provenientes del estados de Puebla.

Sin embargo, de las películas elaboradas con dos componentes, las obtenidas a partir de 1.5% de mucílago de nopal con 1% de grenetina (F-9) presentaron PVA, luminosidad y propiedades mecánicas aceptables, por lo que también fueron seleccionadas para el mismo fin. Asimismo, con esta segunda opción se buscó tener una muestra comparativa en cuanto a la influencia de la cera de abeja en el color, la apariencia visual y la aceptabilidad que provocaría la aplicación de estos dos tipos de RC en la ciruela.

6.2. APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO COMESTIBLE EN CIRUELA

6.2.1. Efecto de la aplicación de recubrimientos comestibles en los parámetros de calidad de ciruela.

- **Parámetros de calidad en ciruela fresca**

Los frutos cumplieron con las especificaciones para ser considerados de primera categoría de acuerdo con el Reglamento (CE) n° 1168/1999 de la unión europea, a pesar de que presentaron ligeros defectos de forma, desarrollo y coloración, pero sin ninguna alteración en la epidermis ni deterioro en la pulpa (Figura 19).



Figura 19. Apariencia visual de las ciruelas estudiadas

Las ciruelas presentaron las características propias de la variedad, con un peso promedio de 35.51 ± 1.96 g, presentando un calibre medio para el mercado de acuerdo al reglamento antes citado (Cuadro 9).

Cuadro 9. Caracterización física de las ciruelas de estudio.

	Peso promedio (g)	Diámetro ecuatorial promedio (cm)	Diámetro longitudinal promedio (cm)	Luminosidad	Croma	Tono
Ciruela	35.51 ± 1.96	3.80 ± 0.17	4.0 ± 0.18	29.49 ± 1.85	35.76 ± 2.78	20.43 ± 1.48

Los datos son la media de 36 frutos \pm SD

6.2.1.1. Pérdida de peso

Uno de los factores más importantes para conservar la calidad de las frutas es evitar la pérdida de agua o peso que se da durante su almacenamiento. La pérdida de peso en frutas se debe al proceso de transpiración (cuando el agua pasa del estado líquido a gaseoso) que se da en las mismas, el cual está determinado por el gradiente de presión de vapor de agua entre el medio y el fruto. Cuando se da la pérdida de agua en las frutas, muchas de las veces también se presenta una pérdida de firmeza, además de un estrés hídrico que puede causar cambios metabólicos y alteraciones en la actividad enzimática, senescencia acelerada, reducción en las propiedades organolépticas del producto, disminución en el valor nutricional y un incremento en la susceptibilidad a daños por frío e invasión de patógenos (Valero *et al.*, 2013; Olivas y Barbosa-Cánovas, 2009). En ciruelas, la presencia de una capa de cera externa o cera epicuticular que aumenta la resistencia de la cutícula a la difusión del agua reduce la deshidratación de las mismas (Navarro-Tarazaga, 2007). Además, la aplicación de RC supone una barrera adicional, pues estos actúan como una barrera extra que cubre los estomas de las frutas, lo que conlleva a una disminución de la transpiración, y por lo tanto a una reducción de la pérdida de peso, siendo este un efecto primario de las cubiertas comestibles (Valero *et al.*, 2013).

La pérdida de peso en todas las muestras se incrementó gradualmente conforme el tiempo de almacenamiento fue en aumento, con un promedio de 5.34% cuando el fruto estaba en refrigeración (día 1-30) e incrementándose de manera considerable hasta un promedio de 14.86% cuando los frutos fueron transferidos a temperatura ambiente (día 30-36). También se observó que los RC que contienen cera de abeja en su formulación fueron 28% más efectivos reduciendo la pérdida de peso a partir de la segunda semana de almacenamiento a 1 °C y hasta el final de todo el periodo de almacenamiento (Figura 20).

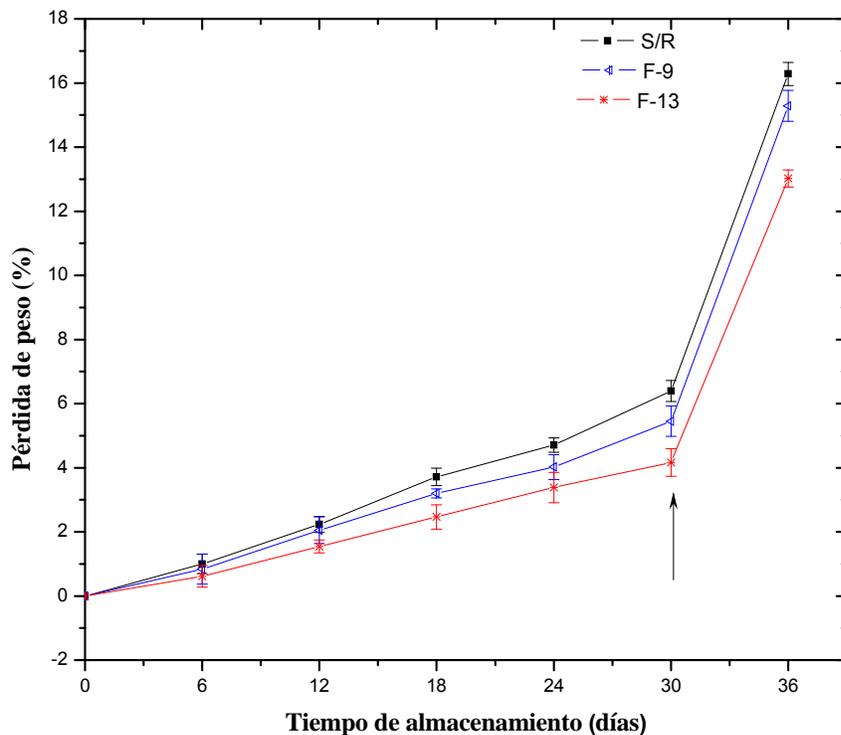


Figura 20. Evolución de la pérdida de peso (%) en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos, donde S/R: sin recubrimiento, F-9: 1.5% de mucílago de nopal, 1% de grenetina, F-13: 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina, 0.5% cera de abeja, almacenadas por 30 días a 1 °C más 6 días a 25 °C (la flecha indica el cambio de temperatura en el almacenamiento). Cada punto representa la media de 12 frutos y las barras verticales \pm SD.

Las ciruelas que mayor pérdida de peso tuvieron fueron las que no se les aplicó ningún recubrimiento, seguidas de las cubiertas con la formulación 9 (mucílago de nopal y grenetina) y por último las ciruelas cubiertas con mucílago de nopal, grenetina y cera de abeja, mostrando una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las tres muestras al final del primer periodo de almacenamiento (día 1-30 a 1 °C) y entre las dos primeras y las que se recubrieron con cera de abeja al final del segundo periodo de almacenamiento (día 31-36 a 25 °C).

De manera general, la incorporación de cera de abeja en los RC ayudó a disminuir la pérdida de peso en ciruelas, lo que podría indicar que los recubrimientos con componentes hidrofóbicos ayudan a ejercer una mejor barrera al agua; resultado que coincide con los trabajos presentados por Navarro-Tarazaga *et al.* (2011) en donde se aplicaron recubrimientos a base de HPMC con cera de abeja en ciruelas, Reinoso *et al.* (2008) en

ciruelas con recubrimientos a base de proteína de suero aislado con aceite de linaza y cera de abeja y por Pérez-Gago *et al.* (2003) en donde la pérdida de peso de las ciruelas recubiertas a base de HPMC, disminuyó conforme el contenido del lípido (cera de abeja) se incrementó en la formulación.

Por otro lado, el recubrimiento sin cera de abeja también ayudó a disminuir 14.77% la pérdida de peso en ciruelas al final del primer periodo de almacenamiento (día 1-30 a 1 °C), con respecto a aquellas sin recubrir, sin embargo, al final del segundo periodo de almacenamiento (día 31-36 a 25 °C) no se presentó diferencia significativa ($p > 0.05$) entre ambas. Asimismo, su efecto no fue tan considerable como en el caso de aquellas con cera de abeja en su formulación. Este resultado coincide con los obtenidos por Valero *et al.* (2013) en donde hubo una disminución de la pérdida de peso en ciruelas con recubrimiento a base de alginato (en este trabajo se remarca que la adición de glicerol como plastificante también contribuyó a la reducción de la pérdida de peso) y por Reinoso *et al.* (2008) en donde ciruelas cubiertas con proteína de suero mostraron una ligera disminución de la pérdida de peso con respecto a las ciruelas sin recubrir.

Cabe mencionar que en la caracterización de las películas también se observó que aquellas con cera de abeja en su formulación fueron las que presentaron una menor permeabilidad al vapor de agua, coincidiendo de esta manera los comportamientos que se dan entre las películas y el recubrimiento aplicado en el fruto. Lo anterior se menciona debido a que muchas veces los comportamientos entre una y otra son desiguales, manifestándose diferencias considerables entre ambas, las cuales en muchas ocasiones se atribuyen a factores como la distribución del recubrimiento en la superficie de la fruta, la capacidad del mismo de formar una capa continua y/o de penetrar en los poros del fruto, la morfología de la piel y las propiedades fisicoquímicas (viscosidad y tensión superficial, principalmente) del recubrimiento (Hagenmaier y Baker, 1993, citados por Navarro-Tarazaga, 2007).

6.2.1.2. Firmeza

En general, la firmeza de todas las muestras de ciruela, sometidas a diferentes tratamientos, disminuyó conforme transcurrió el tiempo de almacenamiento (Figura 21). Aunque al igual

que en la pérdida de peso, la mayor pérdida de firmeza se dio en los últimos 6 días de almacenamiento, esto es, cuando las frutas fueron trasladadas a una temperatura de 25 °C; con un promedio de disminución de firmeza de 23.32% cuando las muestras estaban en refrigeración (días 1-30) y de 58.11% cuando éstas fueron transferidas a temperatura ambiente (días 31-36). Asimismo, se observó que los RC que contienen cera de abeja en su formulación fueron 18.43% más efectivos reduciendo la pérdida de firmeza de las ciruelas al final del segundo periodo de almacenamiento (día 31-36 a 25 °C) en comparación con las ciruelas sin recubrir.

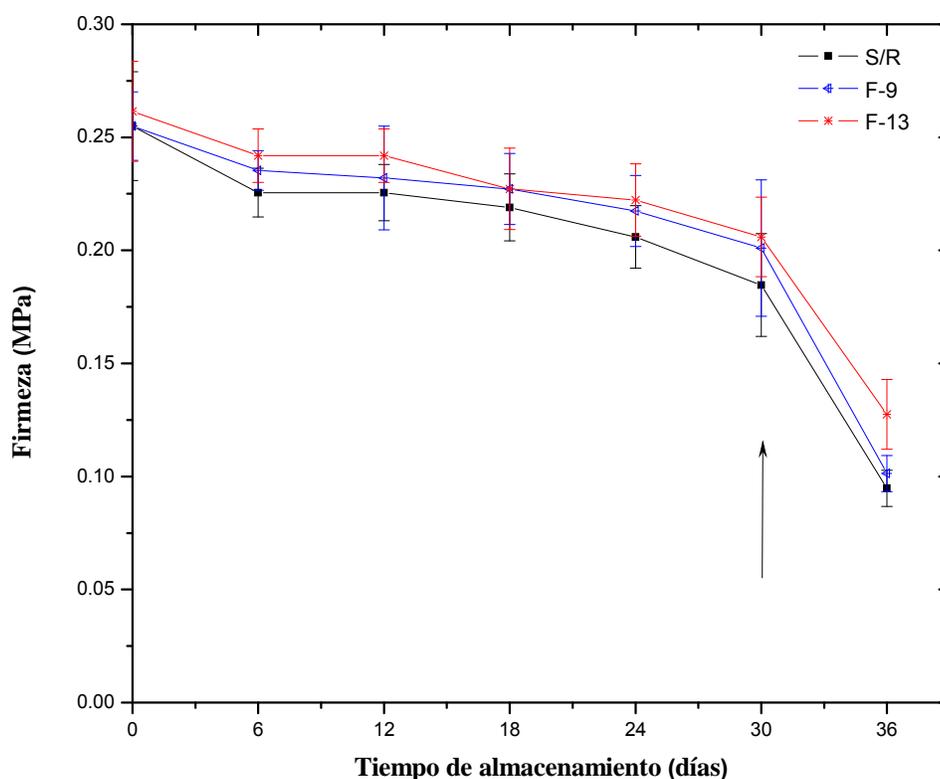


Figura 21. Evolución de la Firmeza (MPa) en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos, donde S/R: sin recubrimiento, F-9: 1.5% de mucílago de nopal, 1% de grenetina, F-13: 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina, 0.5% cera de abeja, almacenadas por 30 días a 1 °C más 6 días a 25 °C (la flecha indica el cambio de temperatura en el almacenamiento). Cada punto representa la media de 12 frutos y las barras verticales \pm SD.

La menor pérdida de firmeza se dio en ciruelas recubiertas con 0.5% mucílago de nopal, 0.5% grenetina, 0.5% cera de abeja (F-13); las cuales presentaron valores promedio de 21.1 y 51.25% para el primer (días 1-30 a 1 °C) y segundo (días 31-36 a 25 °C) periodo de almacenamiento, respectivamente, seguida de las ciruelas cubiertas con 1.5% de mucílago

de nopal y 1% de grenetina (F-9) con un valor de 21.25% para el periodo de almacenamiento a 1 °C (días 1-30) y 60.26% para el segundo periodo de almacenamiento (días 31-36 a 25 °C), finalmente las frutas sin recubrir presentaron la mayor pérdida de firmeza con valores de 27.56 y 62.83% para el primer y segundo periodo de almacenamiento, respectivamente. Al final de todo el periodo de almacenamiento no hubo una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las ciruelas tratadas con el recubrimiento sin cera de abeja y aquellas sin recubrir. Sin embargo, si se presentó una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las ciruelas tratadas con el recubrimiento con cera de abeja y aquellas sin cera de abeja y sin recubrir.

La pérdida de firmeza de la pulpa de las frutas está relacionado con los cambios en la composición de la pared celular de las frutas como la degradación de las pectinas y hemilcelulosas en la misma, en donde intervienen procesos de hidrólisis enzimática, los cuales son mayores con la presencia de etileno en frutos climatéricos (Valero *et al.*, 2013; Navarro-Tarazaga, 2011).

El almacenamiento en frío o en refrigeración a una temperatura óptima, además del uso de RC con cera de abeja, que tienen la capacidad de funcionar como una barrera semipermeable al O₂ y CO₂ modificando la atmósfera interna de la fruta, funcionando como una atmósfera modificada, la cual contribuye a disminuir o inhibir la producción de etileno, reducir el metabolismo y respiración de la ciruela y particularmente la degradación de su pared celular, que contribuyen a ralentizar los procesos de senescencia del fruto en general y el ablandamiento de la pulpa en particular, son factores que podrían estar relacionados con la disminución de la pérdida de firmeza de las ciruelas recubiertas reportado en este trabajo (Valero *et al.*, 2013; Navarro-Tarazaga *et al.*, 2011; Paliyath y Murr, 2008; Navarro-Tarazaga *et al.*, 2008; Cisneros-Zevallos y Krochta, 2003; Pérez-Gago *et al.*, 2003).

Resultados similares a este trabajo han sido observados en ciruelas con RC a base de HPMC con cera de abeja (Navarro-Tarazaga *et al.*, 2011; Navarro-Tarazaga *et al.*, 2008 y Pérez-Gago *et al.*, 2003) y a base de alginato (Valero *et al.*, 2013).

6.2.1.3. Sólidos solubles

Las ciruelas son frutas con una vida de almacenamiento poscosecha limitada, debido a un aumento en la pérdida de calidad de las mismas durante su almacenamiento, afectando algunas de sus propiedades más importantes como color, firmeza, sólidos solubles, acidez y textura (Díaz-Mula *et al.*, 2011). En el presente trabajo se pudo observar que los sólidos solubles en todas las muestras se incrementaron gradualmente conforme el tiempo de almacenamiento fue avanzando, con un aumento promedio de 2.72% cuando los frutos estaba en refrigeración (día 1-30) y de 5.69% cuando los frutos fueron transferidos a temperatura ambiente (día 30-36), presentándose un ligero incremento en esta etapa (Figura 22). El aumento de los sólidos solubles se debe a un incremento en las concentraciones de azúcares como resultado del proceso de maduración de las ciruelas. Este incremento de sólidos solubles usualmente es acompañado por una disminución de la acidez (Valero *et al.*, 2013; Candan, 2010).

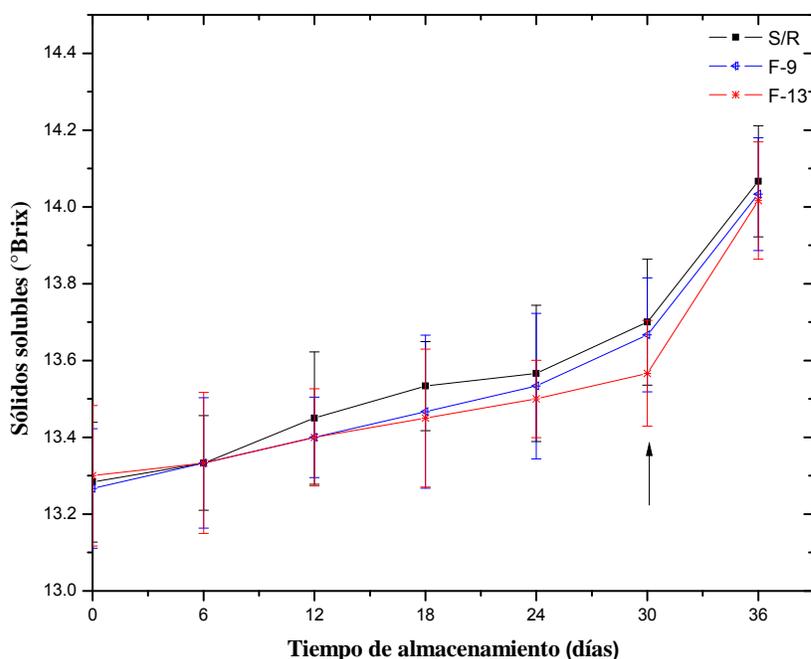


Figura 22. Evolución de los sólidos solubles (°Brix) en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos, donde S/R: sin recubrimiento, F-9: 1.5% de mucílago de nopal, 1% de grenetina, F-13: 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina, 0.5% cera de abeja, almacenadas por 30 días a 1 °C más 6 días a 25 °C (la flecha indica el cambio de temperatura en el almacenamiento). Cada punto representa la media de 12 frutos y las barras verticales \pm SD.

El aumento en sólidos solubles en ciruelas no presentó diferencia significativa ($p < 0.05$) en todos los tratamientos durante y al final de todo el periodo de almacenamiento. Sin embargo, a continuación se hace una descripción de las tendencias que mostraron cada uno los tratamientos: Al final del periodo de almacenamiento, los recubrimiento con 0.5% mucílago de nopal, 0.5% grenetina, 0.5% cera de abeja (F-13) mostraron una tendencia a disminuir el aumento de sólidos solubles en las ciruelas recubiertas, las cuales presentaron valores promedio en el incremento de sólidos solubles del 5.38%, seguida de las ciruelas cubiertas con 1.5% de mucílago de nopal y 1% de grenetina (F-9) con un valor de 5.77% y finalmente las frutas sin recubrir, las cuales presentaron un aumento de sólidos solubles de 5.90%.

Díaz-Mula *et al.* (2009) han reportado que se dio un aumento del contenido de sólidos solubles durante el almacenamiento poscosecha a 2 °C en diferentes variedades de ciruelas (Angelino, Black Amber, Black Diamond, Larry Ann y Songold). Sin embargo, Díaz-Mula *et al.* (2011) han reportado que el uso del empacado en atmósferas modificadas de diferentes cultivares de ciruelas tiene un efecto positivo en disminuir el aumento de sólidos solubles totales en estos frutos, almacenados a 2 °C. Por otro lado, Eum *et al.* (2009) reportaron que no hubo ningún cambio significativo del contenido de sólidos solubles durante el almacenamiento a temperatura ambiente de ciruelas recubiertas con un material basado en carbohidratos (Versasheen) con y sin sorbitol en comparación con aquellas sin recubrir, resultado que es similar al obtenido en este trabajo.

6.2.1.4. pH

De manera general, el pH en las ciruelas se incrementó conforme aumento el tiempo de conservación, lo que podría atribuirse a una disminución de ácidos orgánicos en las ciruelas debido al consumo o uso de estos compuestos como sustratos para el metabolismo respiratorio de la mismas, lo que causó una disminución de la acidez y por lo tanto un aumento del pH en estas frutas (Valero *et al.*, 2013; Díaz-Mula *et al.*, 2009).

No hubo ninguna diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los dos recubrimientos utilizados durante todo el periodo de almacenamiento, lo que indicó que la adición de la cera de abeja

no tuvo ningún efecto significativo en los cambios de pH de las ciruelas recubiertas. Sin embargo, si se presentó una diferencia significativa ($p < 0.05$) al final del segundo periodo de almacenamiento entre las muestras recubiertas y aquellas sin recubrir.

El mayor incremento de pH lo presentaron las ciruelas sin recubrir con un aumento total de 12.97%, en comparación con las ciruelas recubiertas con 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina y 0.5% de cera de abeja (F-13), las cuales presentaron un incremento total de 6.04%, con valores finales de pH igual a 3.48 y 3.21, para las frutas sin recubrir y para las recubiertas con la formulación 13, respectivamente (Figura 23).

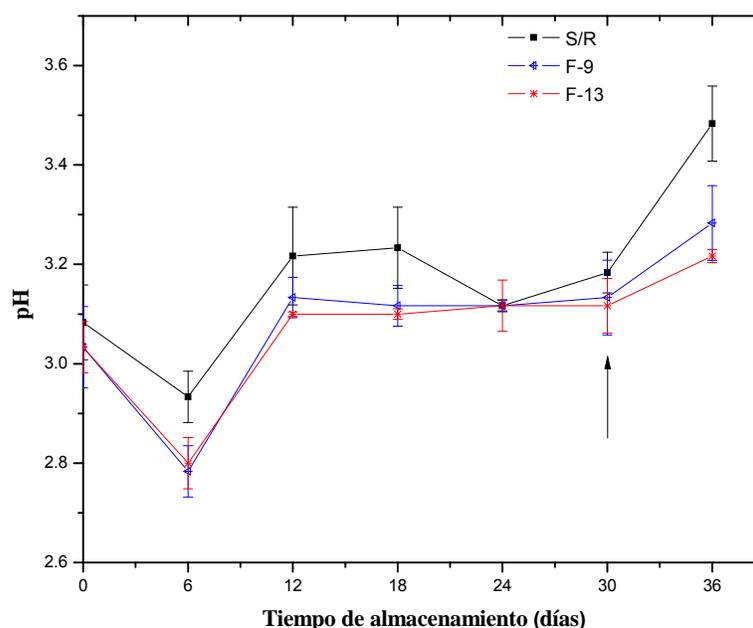


Figura 23. Evolución del pH en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos, donde S/R: sin recubrimiento, F-9: 1.5% de mucílago de nopal, 1% de grenetina, F-13: 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina, 0.5% cera de abeja, almacenadas por 30 días a 1 °C más 6 días a 25 °C (la flecha indica el cambio de temperatura en el almacenamiento). Cada punto representa la media de 12 frutos y las barras verticales \pm SD.

El hecho de que el uso de RC haya permitido evitar un mayor aumento del pH en las ciruelas recubiertas se debe a que su uso permite desarrollar una barrera semipermeable al O_2 y CO_2 modificando la atmósfera interna de la fruta, funcionando así como una atmósfera modificada que contribuye reducir el metabolismo y respiración de este fruto y por lo tanto

a ralentizar el consumo o uso de ácidos orgánicos como sustratos para el metabolismo respiratorio de las mismas (Valero *et al.*, 2013; Navarro-Tarazaga *et al.*, 2011; Díaz-Mula *et al.*, 2011 y 2009; Paliyath y Murr, 2008).

Comparando los resultados obtenidos en el presente trabajo con otros estudios, se observa que Eum *et al.* (2009) también reportaron un aumento del pH en ciruelas japonesas durante su almacenamiento, aunque reportaron que el uso de recubrimientos comestibles a base de carbohidratos (Versasheen) contribuyó a disminuir el cambio en el pH, resultando en un menor incremento del pH en ciruelas recubiertas al final del periodo, en comparación con las frutas no recubiertas.

6.2.1.5. Acidez

En general, la acidez de los frutos disminuyó conforme el tiempo de almacenamiento fue en aumento, con una reducción promedio de 10.91% cuando el fruto estaba en refrigeración (día 1-30), presentándose un mayor decremento con un promedio 21.33% cuando los frutos fueron transferidos a una temperatura de 25 °C (día 30-36). También se observó que el uso de RC contribuyó a reducir la disminución de la acidez en las ciruelas (Figura 24).

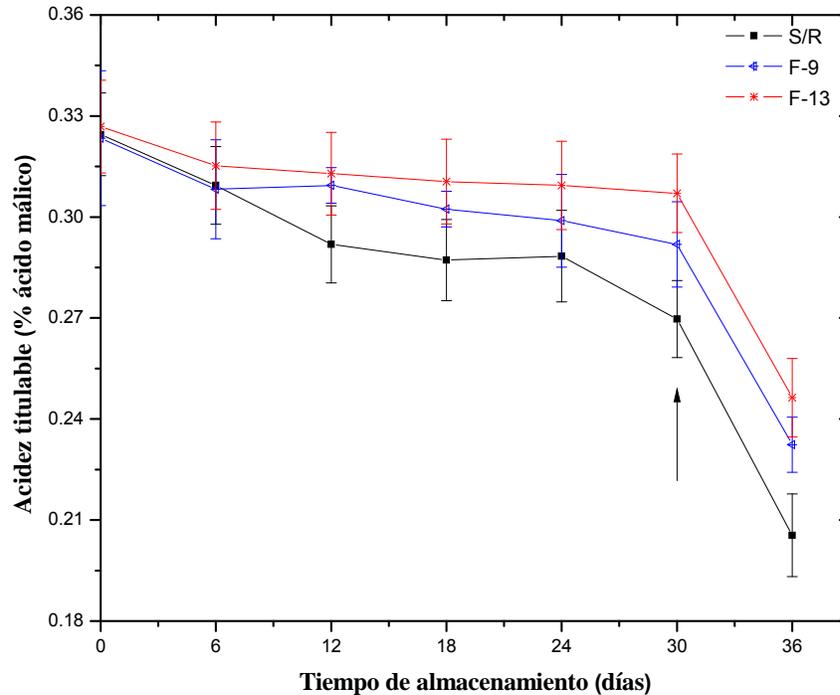


Figura 24. Evolución de la acidez en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos, donde S/R: sin recubrimiento, F-9: 1.5% de mucílago de nopal, 1% de gretetina, F-13: 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de gretetina, 0.5% cera de abeja, almacenadas por 30 días a 1 °C más 6 días a 25 °C (la flecha indica el cambio de temperatura en el almacenamiento). Cada punto representa la media de 12 frutos y las barras verticales \pm SD.

Los recubrimientos con 0.5% mucílago de nopal, 0.5% gretetina, 0.5% cera de abeja (F-13) presentaron una mejor tendencia a evitar los cambios de acidez en las ciruelas tratadas con estas formulación, las cuales presentaron una disminución de la acidez del 24.64% durante todo el periodo de almacenamiento, seguida de las ciruelas cubiertas con 1.5% de mucílago de nopal y 1% de gretetina (F-9) con una disminución del 28.16%. Sin embargo, estadísticamente no hubo diferencia significativa ($p > 0.05$) entre los recubrimientos con y sin cera de abeja durante todo el periodo de almacenamiento, lo que indicó que la adición de este lípido no tuvo ningún efecto significativo en los cambios de acidez de las ciruelas recubiertas.

Por otro lado, si se presentó diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las muestras recubiertas y aquellas sin recubrir al final del segundo periodo de almacenamiento, ya que fueron las ciruelas sin recubrir las que presentaron la mayor disminución de acidez, con un valor de 36.70%, lo que indicaría que los RC (con y sin cera de abeja) si ayudaron a disminuir la maduración y senescencia de las frutas y con ello a mantener por mayor tiempo su acidez.

La disminución o balance negativo de ácidos orgánicos en las ciruelas podría deberse a que la disminución de la acidez es un comportamiento típico que se da durante el almacenamiento poscosecha de estas frutas, que se atribuye al consumo o uso de ácidos orgánicos como sustratos para el metabolismo respiratorio de la mismas (Valero *et al.*, 2013; Díaz-Mula *et al.*, 2009). El hecho de que el uso de RC haya permitido evitar una mayor disminución de la acidez en las ciruelas recubiertas se debe a que, como ya se mencionó anteriormente, su uso permite desarrollar una barrera semipermeable al O₂ y CO₂ modificando la atmósfera interna de la fruta, funcionando así como una atmósfera modificada que contribuye a retardar los cambios ocasionados por la maduración del fruto (Valero *et al.*, 2013; Navarro-Tarazaga *et al.*, 2011; Díaz-Mula *et al.*, 2011; Paliyath y Murr, 2008).

Valero *et al.* (2013) reportaron una menor disminución de la acidez en diferentes variedades de ciruelas recubiertas con alginato al 1 y 3% en comparación con las frutas sin recubrir. Asimismo, Díaz-Mula *et al.* (2011) obtuvieron una disminución de acidez en cuatro variedades de ciruelas durante su almacenamiento a 2 °C, aunque reportaron que el uso de atmósferas modificadas contribuye a retardar la pérdida de acidez de las mismas. Finalmente, Eum *et al.* (2009) encuentran que el uso de RC a base de carbohidratos (Versasheen) con y sin sorbitol contribuyó a disminuir el cambio en la acidez en ciruelas japonesas almacenadas a una temperatura de 20 °C durante 8 días de almacenamiento.

6.2.1.6. Color Externo

El color de los frutos es uno de los factores más importantes que influye considerablemente en la evaluación de la calidad y la aceptación del producto por parte del consumidor ya que es un indicador de la madurez del fruto. Los cambios de color en la piel de las ciruelas rojas se debe principalmente a un aumento en la concentración de antocianinas en la piel del fruto las cuales están asociadas a procesos de maduración poscosecha (Valero *et al.*, 2013; Díaz-Mula *et al.*, 2009; Usenik *et al.*, 2009). Para la evaluación del color generalmente se evalúan tres aspectos, los cuales son: luminosidad, *chroma* y tono. Una disminución en los valores de luminosidad es un indicador del oscurecimiento de las frutas durante su almacenamiento, asimismo cuando se presenta una disminución en el *chroma* se puede interpretar como un cambio a colores menos vivos o intensos relacionados con la

senescencia de la fruta, finalmente una disminución del tono o *hue* podría indicar un cambio de color, desde rojo a violeta, en las frutas con colores rojo-violáceos (Holcroft y Kader, 1999, citados por Navarro-Tarazaga, 2007). Es decir, el croma y el tono son siempre más altos en ciruelas parcialmente maduras que en aquellas con una mayor maduración.

- **Luminosidad**

La luminosidad en las ciruelas varió con el tiempo de almacenamiento y con la aplicación de los recubrimientos, presentándose una disminución de la misma conforme el tiempo de almacenamiento fue en aumento, lo que podría traducirse en un oscurecimiento del color (Figura 25).

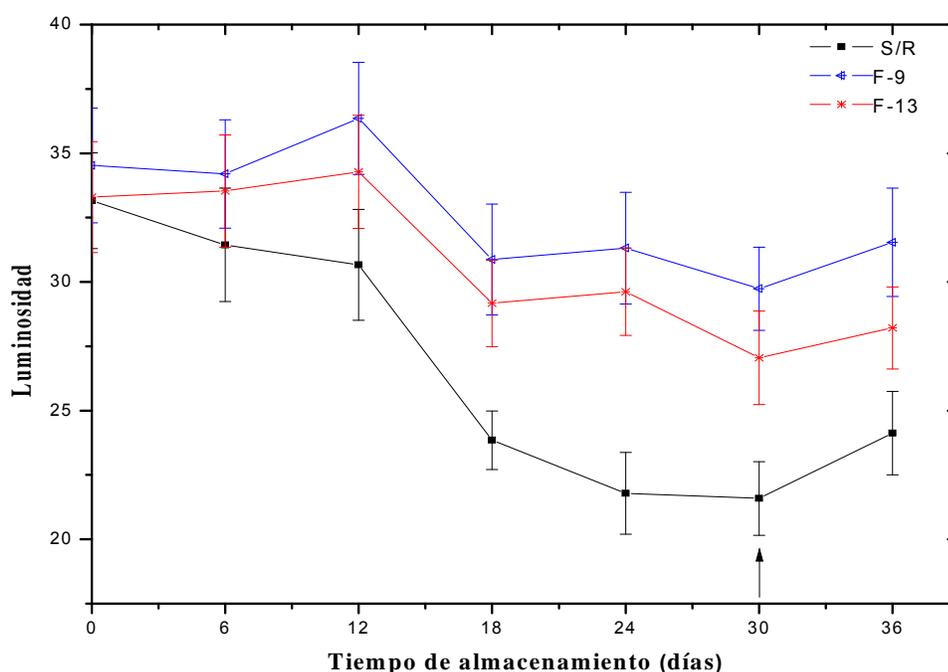


Figura 25. Evolución de la *luminosidad* en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos, donde S/R: sin recubrimiento, F-9: 1.5% de mucílago de nopal, 1% de grenetina, F-13: 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina, 0.5% cera de abeja, almacenadas por 30 días a 1 °C más 6 días a 25 °C (la flecha indica el cambio de temperatura en el almacenamiento). Cada punto representa la media de 12 frutos y las barras verticales \pm SD.

Al final del primer periodo de almacenamiento (días 1-30 a 1 °C) no hubo diferencia significativa ($p > 0.05$) entre los dos recubrimientos utilizados, aunque sí la hubo ($p < 0.05$)

entre éstos y las ciruelas sin recubrir. Por otro lado, al final del segundo periodo de almacenamiento (día 31-36 a 25 °C) sí se presentó una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre todos los tratamientos, observándose que la aplicación de recubrimientos comestibles modificaron los resultados de luminosidad en las ciruelas.

Las ciruelas recubiertas con 1.5% de mucílago de nopal y 1% de grenetina (F-9) presentaron la mayor luminosidad al final de todo el periodo de almacenamiento con un valor final de 31.54, seguidas de las cubiertas con 0.5% mucílago de nopal, 0.5% grenetina y 0.5% cera de abeja (F-13) con un valor de 28.21 y finalmente, las ciruelas sin recubrir con un valor de luminosidad final de 24.13.

Eum *et al.* (2009) reportaron que el uso de recubrimientos comestibles a base de carbohidratos (Versasheen) como plastificante contribuyó a aumentar los valores iniciales de luminosidad en ciruelas almacenadas a 20 °C durante 8 días, además reportaron una menor disminución de la luminosidad en las mismas en comparación con aquellas sin ningún tratamiento. Navarro-Tarazaga (2007) observó una disminución en la luminosidad en ciruelas Angeleno, lo que interpretó como un oscurecimiento del color de la piel en las mismas, aunque no reportó alguna influencia sobre la luminosidad por la aplicación de recubrimientos comestibles a base de HPMC con cera de abeja en estos frutos.

- ***Croma***

El croma no presentó una tendencia definida durante todo el periodo de almacenamiento de las ciruelas tratadas; en todos los tratamientos aplicados el *croma* disminuyó hasta los primeros 12 días de almacenamiento, posteriormente se presentó un ligero aumento del mismo durante los siguientes doce días, para comenzar a disminuir hasta el final del periodo de almacenamiento (Figura 26).

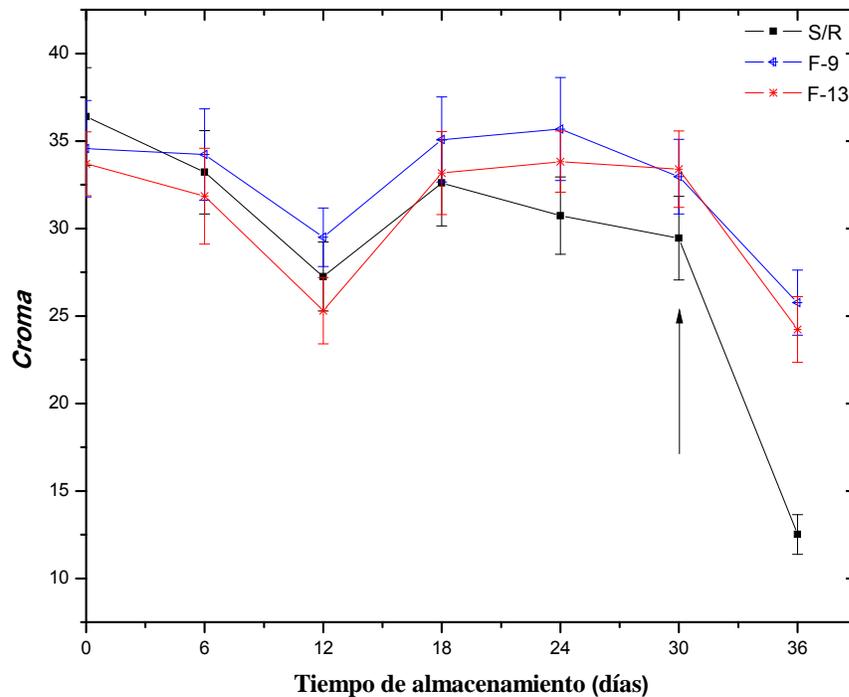


Figura 26. Evolución del *croma* en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos, donde S/R: sin recubrimiento, F-9: 1.5% de mucílago de nopal, 1% de grenetina, F-13: 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina, 0.5% cera de abeja, almacenadas por 30 días a 1 °C más 6 días a 25 °C (la flecha indica el cambio de temperatura en el almacenamiento). Cada punto representa la media de 12 frutos y las barras verticales \pm SD.

Estadísticamente no se presentó diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las ciruelas sin recubrir y aquellas con recubrimiento durante los primeros 18 días de almacenamiento. Asimismo, al final del primer periodo de almacenamiento (1 °C y 30 días de almacenamiento) no hubo una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las ciruelas sin recubrir y las recubiertas con las formulaciones 9 y 13.

Por otro lado, sí se presentó una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las muestras sin recubrir y las recubiertas después de su transferencia a 25 °C y al final de todo el periodo de almacenamiento (30 días a 1 °C + 6 días a 25 °C), siendo las ciruelas recubiertas con 1.5% de mucílago de nopal y 1% de grenetina (F-9) las que presentaron 48.55% mayor *croma* ($C=25.77$) en comparación con las ciruelas sin recubrir las cuales presentaron los valores más bajos ($C=12.51$).

Finalmente, se puede observar que hubo un descenso del *croma* durante los últimos 12 días de almacenamiento, comportamiento que es similar a los resultados presentados por Valero *et al.* (2013) que reportan que el uso de RC a base de alginato retrasaron los cambios de

color en la piel de ciruelas recubiertas, resultado que se vio reflejado en una menor disminución de los valores de croma o un croma más alto en comparación con las ciruelas sin ningún recubrimiento.

- **Tono**

En general, el tono o °hue en las ciruelas varió con el tiempo de almacenamiento y con la aplicación de RC, presentándose una disminución de la misma en los tres tratamientos conforme el tiempo de almacenamiento aumento (con una ligera alteración entre los 12 y 24 días de almacenamiento en las ciruelas recubiertas con 1.5% de mucílago de nopal y 1% de grenetina), lo que podría traducirse en un cambio de coloración de rojo a rojo oscuro (Figura 27).

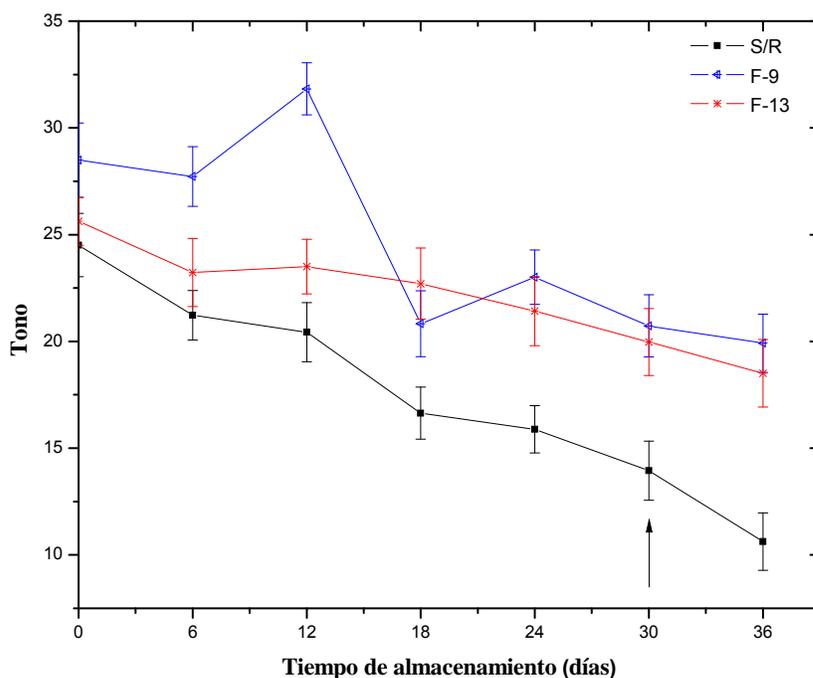


Figura 27. Evolución del tono (°hue) en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos, donde S/R: sin recubrimiento, F-9: 1.5% de mucílago de nopal, 1% de grenetina, F-13: 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina, 0.5% cera de abeja, almacenadas por 30 días a 1 °C más 6 días a 25 °C (la flecha indica el cambio de temperatura en el almacenamiento). Cada punto representa la media de 12 frutos y las barras verticales \pm SD.

En los primeros días de almacenamiento el tono no se vio afectado por los tratamientos aplicados. No se presentó diferencia significativa ($p < 0.05$) en todos los recubrimientos aplicados al final del primer periodo de almacenamiento (día 1-30 a 1 °C). Asimismo, si hubo una diferencia significativa ($p < 0.05$) al final del segundo periodo de almacenamiento (día 31-36 a 25 °C) entre las ciruelas recubiertas y aquellas sin recubrir, observándose que la aplicación de RC modificaron los resultados de tono en las ciruelas al final de todo el tiempo de conservación. Las ciruelas recubiertas con 1.5% de mucílago de nopal y 1% de grenetina (F-9) fueron las que presentaron el mayor tono (46.61% más) al final de los dos periodos de almacenamiento (30 días a 1 °C + 6 días a 25 °C), en comparación con las ciruelas sin recubrir las cuales presentaron los valores más bajos. Los valores de tono al final del primero y segundo periodo de almacenamiento son de 20.73 y 19.91; 19.94 y 18.51; 13.95 y 10.63 para las ciruelas recubiertas con la formulación 9, 13 y sin recubrir, respectivamente.

De manera general se pudo observar que las ciruelas sin recubrir presentaron valores de tono más bajos en comparación con las ciruelas recubiertas y conforme avanzó el tiempo de almacenamiento este comportamiento se mantuvo, debido a que el uso de RC favoreció el retraso de la maduración de las ciruelas y por lo tanto contribuyó a ralentizar, principalmente, la biosíntesis de antocianinas y por ende, los cambios de color (de rojo a rojo intenso u oscuro) en la piel de las mismas al final del tiempo de almacenamiento. Un incremento en las antocianinas de la piel de las ciruelas se refleja en una disminución de los valores de tono o °hue, mostrando que estos pigmentos contribuyen a los cambios de color asociados con procesos de maduración en la poscosecha (Díaz-Mula *et al.*, 2011).

Díaz-Mula *et al.* (2011) reportaron una menor disminución de los valores de tono o °hue para cuatro diferentes variedades de ciruela (Blackamber, Larry Ann, Golden Globe y Sungold) durante su almacenamiento a 2 °C durante 35 días en atmósferas modificadas en comparación con aquellas almacenadas sin ningún tratamiento. Eum *et al.* (2009) también reportaron que el uso de RC a base de carbohidratos (Versasheen) con sorbitol como plastificante contribuyó a retrasar los cambios de color (de rojo a rojo intenso) en ciruelas almacenadas a 20 °C durante 8 días, reportando una menor disminución de los valores de °hue para las ciruelas recubiertas en comparación con aquellas sin ningún tratamiento.

Navarro-Tarazaga (2007) reportó que hubo una disminución del tono al prolongarse el almacenamiento en ciruelas Angeleno y que el uso de RC a base HPMC y cera de abeja ralentizó el cambio de color de rojo a rojo violáceo en comparación con las ciruelas sin recubrir.

6.2.2. Análisis sensorial

En el análisis sensorial, los catadores detectaron pérdidas en todos los atributos sensoriales conforme aumento el tiempo de almacenamiento y entre los diferentes tratamientos aplicados (Figuras 28 y 29).

Aunque al inicio del mismo se obtuvo una calificación de *buena* en la apariencia visual, olor y calificación global para todos los tratamientos. En cuanto a la intensidad del color, todos los jueces posicionaron a los tres tratamientos en la tonalidad de *rojo claro*, lo cual indica un estado de madurez óptima, asimismo, detectaron una textura *firme* en los mismos. Respecto a sabor y olores extraños, fueron las ciruelas sin recubrir las únicas que no presentaron alguno, a diferencia de las ciruelas recubiertas con el 0.5% mucílago de nopal, 0.5% de cera de abeja y 0.5% de grenetina (F-13) y 1.5% de mucílago de nopal y 1% de grenetina (F-9), en donde los jueces percibieron un olor a aceite de alguna especia (sin distinguir cual) y un sabor ligeramente astringente, lo que podría indicar que la concentración de aceite esencial de tomillo empleado podría reducirse y así evitar los problemas anteriores.

Cabe mencionar que al inicio del periodo de almacenamiento no hubo diferencia significativa ($p < 0.05$) en la apariencia visual, olor, sabor, textura, olor extraño y calificación global entre las ciruelas recubiertas y aquellas sin ningún recubrimiento. Sin embargo, la intensidad de color y sabor extraño si presentaron una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las ciruelas recubiertas y aquellas sin recubrir.

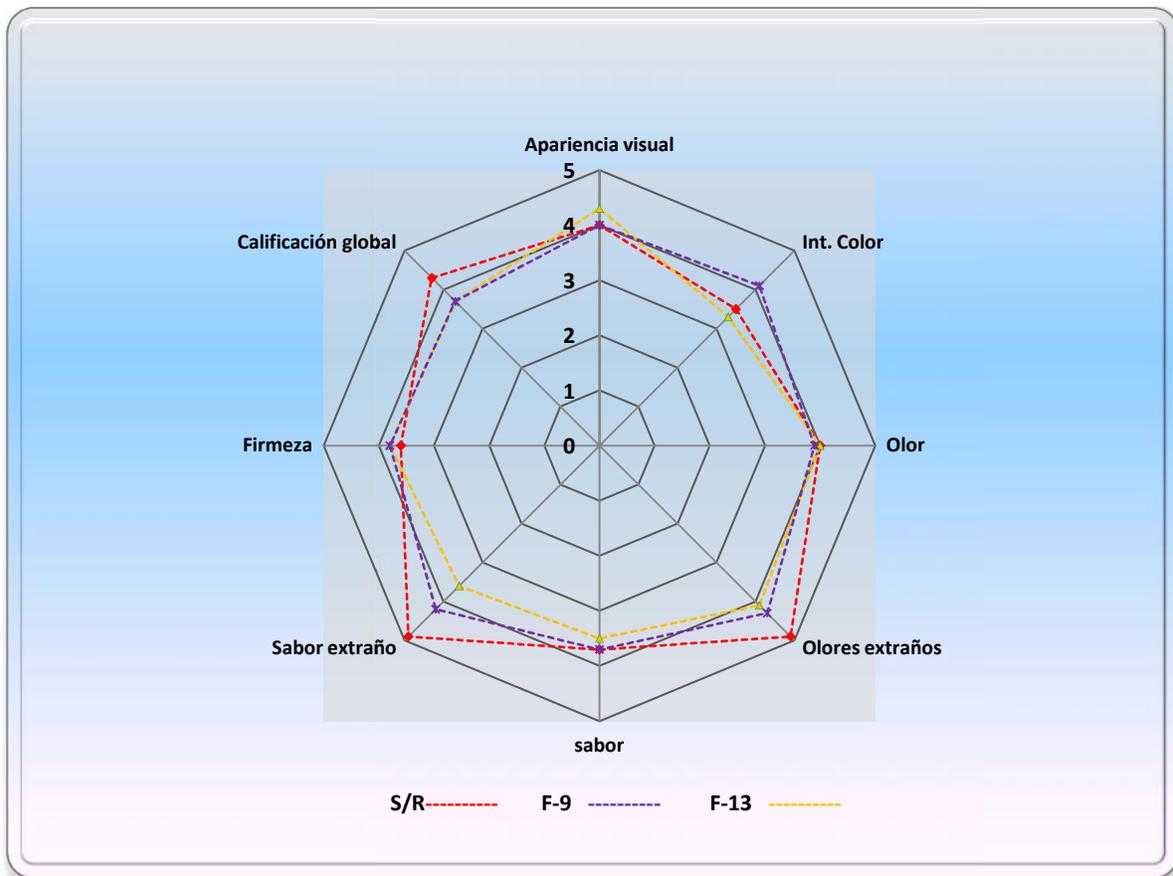


Figura 28. Propiedades sensoriales en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos en el día 1 de almacenamiento, donde S/R=sin recubrimiento, F-9=1.5% de mucílago con 1% de gretetina y F-13=0.5% de mucílago con 0.5% de gretetina y 0.5% de cera de abeja.

Al final de 30 días de almacenamiento a 1 °C; la apariencia visual sufrió una disminución, presentando una calificación de *aceptable* para las ciruelas sin recubrir y recubiertas con la formulación 13, no así para aquellas tratadas con la formulación 9, las cuales presentaron una calificación de *buena*. En cuanto a la clasificación global, las que mejor posicionadas salieron fueron las ciruelas recubiertas con la formulación 13, las cuales presentaron una calificación de *aceptable*.

Para todos los tratamientos, el olor y el sabor presentaron una calificación de *buena* y *aceptable* como límite de consumo, respectivamente. La firmeza sufrió una mayor disminución en la calificación por parte de los jueces, colocando a las ciruelas sin tratar y recubiertas con la formulación 9 como frutos *blandos*, en comparación con aquellas recubiertas con la formulación 13, las cuales presentaron una calificación de frutas *firmes* y

aceptables como límite de consumo, en concordancia con los resultados obtenidos en la evaluación de firmeza de manera mecánica.

Asimismo, al final del periodo de almacenamiento no se presentó una diferencia significativa ($p < 0.05$) en el olor, sabor, apariencia visual, intensidad de color, olor y sabor extraño y calificación global entre las ciruelas recubiertas y aquellas sin ningún recubrimiento. Sin embargo, la textura sí presentó una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las ciruelas recubiertas y aquellas sin recubrir.

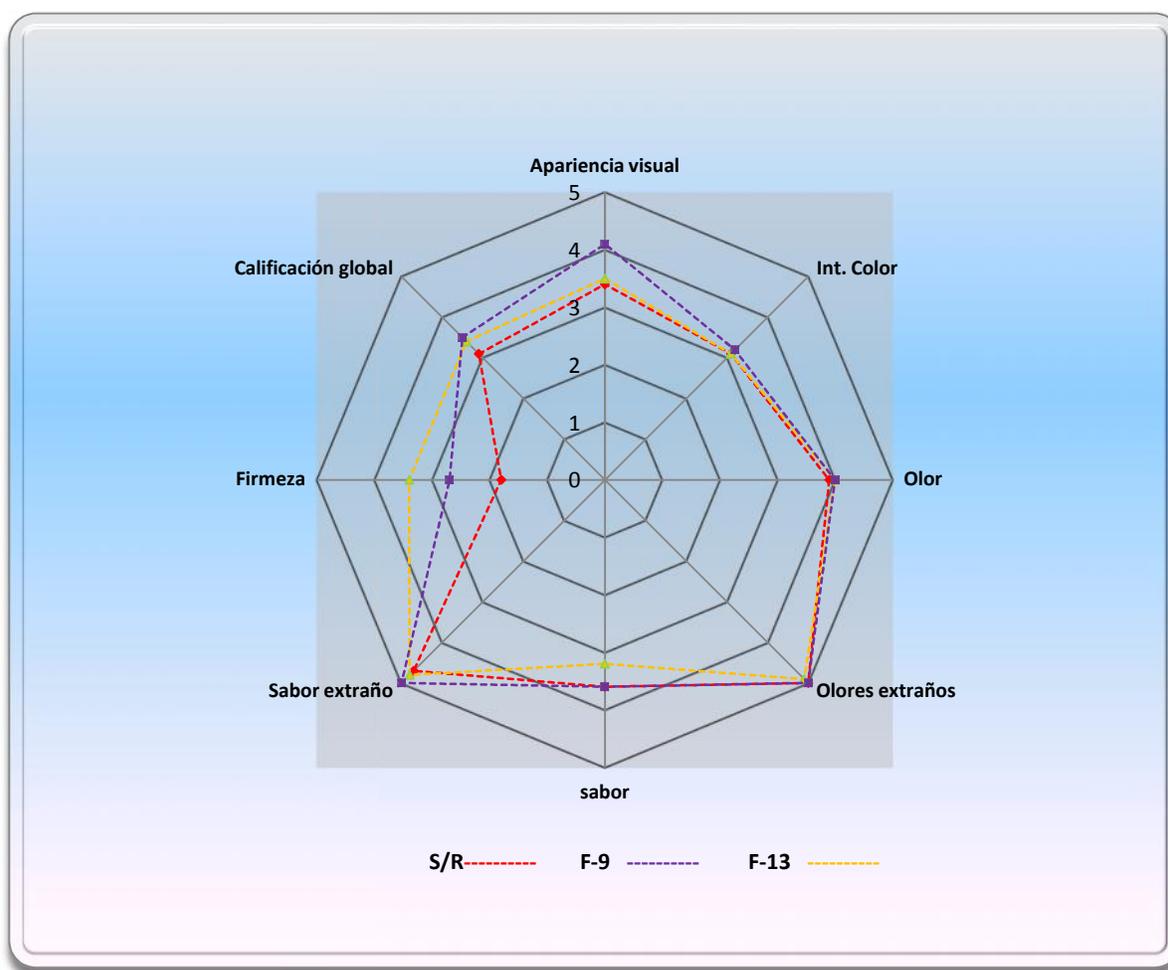


Figura 29. Propiedades sensoriales en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos en el día 30 de almacenamiento, donde S/R=sin recubrimiento, F-9=1.5% de mucílago con 1% de gretina y F-13=0.5% de mucílago con 0.5% de gretina y 0.5% de cera de abeja.

Los olores y sabores extraños ya no fueron percibidos en ninguno de los tratamientos aplicados en las ciruelas al final de los 30 días de almacenamiento a 1 °C, confirmándose que a pesar de que al inicio del almacenamiento las ciruelas recubiertas presentan sabores y olores extraños, debido principalmente a la adición de aceite esencial de tomillo en los RC, estos son disipados en el ambiente a medida que el tiempo de almacenamiento va en aumento.

De manera general, la calidad sensorial de las ciruelas fue reduciéndose conforme paso el tiempo de almacenamiento, sin embargo, al inicio del mismo los consumidores consideraron que las ciruelas cubiertas y sin recubrir eran de *buena calidad* (aunque las ciruelas recubiertas con la formulación 13 presentaron la valoración más baja), para llegar a una calidad *aceptable* como límite de consumo después de 30 días de almacenamiento a 1 °C, en donde las ciruelas recubiertas con 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina y 0.5% de cera de abeja (F-13) se destacaron como aquellas que mejor calidad final presentaron a juicio de los consumidores.

Los resultados obtenidos muestran ser similares a los trabajos presentados por Reinoso *et al.* (2008) quienes mostraron una mejora en la apariencia visual (además de presentar una ligera mejora en la firmeza final) de las ciruelas tratadas con recubrimientos a base de proteína de suero con aceite de linaza mezclado con cera de abeja, en comparación con ciruelas sin recubrir y concluyendo que el uso del RC utilizado no tiene ningún impacto negativo en la percepción del fruto por parte del consumidor.

El impacto en la aceptabilidad de la frutas recubiertas depende principalmente de los diferentes materiales utilizados y la concentración de los mismos en la formulación de los RC (Sothornvit, 2011), aunque en algunos casos su uso no refleja efectos considerables en la calidad sensorial y aceptación por parte del consumidor, sin embargo, en otras ocasiones una mejora tan solo en la apariencia del producto tiene una implicación importante en la comercialización de frutas, pues los consumidores tienden a comprar las frutas que son más atractivas visualmente (Chauhan *et al.*, 2011; Reinoso *et al.*, 2008).

6.2.3. Parámetros fisiológicos

6.2.3.1. Respiración

La respiración de las ciruelas varió con el tiempo de almacenamiento y no con el tipo de recubrimiento aplicado. Al aumentar el tiempo de almacenamiento a 1 °C se observó un incremento gradual de la respiración en todas las muestras y fue a partir de los 30 días y al prolongarse el almacenamiento a 25 °C, cuando se observó el mayor aumento en la misma (Figura 30).

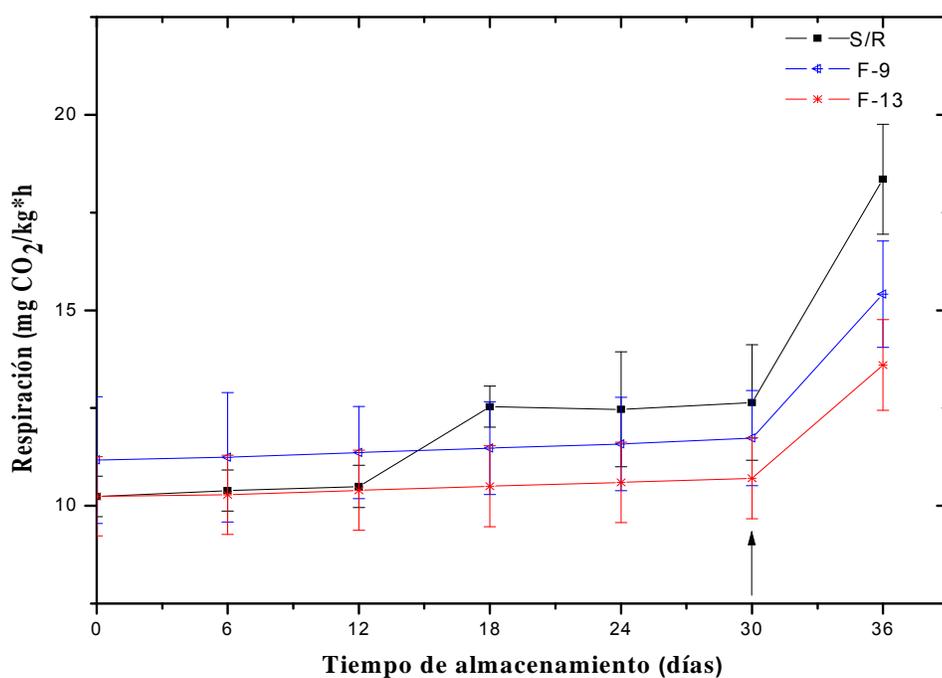


Figura 30. Evolución de la respiración (mg CO₂/kg*h) en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos, donde S/R: sin recubrimiento, F-9: 1.5% de mucílago de nopal, 1% de grenetina, F-13: 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina, 0.5% cera de abeja, almacenadas por 30 días a 1 °C más 6 días a 25 °C (la flecha indica el cambio de temperatura en el almacenamiento). Cada punto representa la media de 12 frutos y las barras verticales \pm SD.

La producción de CO₂ en ciruelas recubiertas y sin recubrir mostró un aumento ligero y de forma gradual desde el inicio del almacenamiento, aunque fueron las ciruelas sin recubrir las que presentaron una mayor tendencia a aumentar la producción de este gas desde los 12 y hasta los 30 días de almacenamiento a 1 °C, asimismo, fueron las que presentaron la

producción más alta de CO₂ al prolongarse el almacenamiento a 25 °C por 6 días, en comparación con las ciruelas recubiertas con 0.5% mucílago de nopal, 0.5% gnetina, 0.5% cera de abeja (F-13), las cuales mostraron la producción más baja en todo el proceso de almacenamiento. Aunque de manera general, el aumento en la producción de CO₂ no presentó estadísticamente diferencia significativa ($p > 0.05$) entre las ciruelas con y sin recubrimiento durante y al final de todo el periodo de almacenamiento, lo que significa que no se observó una disminución de la intensidad respiratoria en los frutos recubiertos en comparación con aquellos sin recubrir.

La respiración, la transpiración y la producción de etileno son los principales factores que contribuyen al deterioro de frutas y vegetales. Durante la respiración se da el consumo de oxígeno y la producción de dióxido de carbono por parte de las frutas, asimismo ocurren diversas reacciones enzimáticas y varios cambios en la composición química y la calidad de las mismas. La tasa de respiración de las frutas se ve influenciada principalmente por la temperatura y la composición de los gases en el medio; cuando la cantidad de oxígeno se reduce, disminuye la respiración y por lo tanto también lo hace la maduración y/o senescencia del fruto. Durante el proceso de maduración de las ciruelas, la tasa de respiración de las mismas sufre un incremento, hasta llegar a la senescencia donde esta comienza a disminuir (Olivas y Barbosa-Cánovas, 2009; Hansmann y Combrink, 2003).

Una menor tasa de respiración durante el almacenamiento de las ciruelas recubiertas podría traducirse en un aumento de su vida útil, ya que a medida que la tasa de respiración es menos elevada se espera una menor producción de CO₂ por parte del fruto, además de un menor deterioro en la calidad de la misma. Este efecto podría ser atribuido a la formación de una barrera a la difusión de gases entre las ciruelas y la atmósfera, mediante el uso de las cubiertas comestibles, las cuales tienen la capacidad de formar una atmósfera modificada alrededor del producto que funciona como una barrera parcial al CO₂ y O₂, coadyuvando a reducir la tasa de respiración de las frutas recubiertas (Dávila-Aviña *et al.*, 2011; Olivas y Barbosa-Canovas, 2009). Sin embargo, esto no siempre se observa en frutos recubiertos dado que la aplicación de los recubrimientos conlleva a una manipulación de las frutas lo que puede generarles estrés y por lo tanto un aumento en la intensidad respiratoria de las mismas (Navarro-Tarazaga, 2007).

En general, los frutos recubiertos mostraron una intensidad respiratoria similar a la de aquellos sin recubrir, lo que se contrapone con los resultados obtenidos por Eum *et al.* (2009) que han reportado que la aplicación de recubrimientos comestibles a base de carbohidratos (Versasheen) con y sin sorbitol contribuyó a disminuir la producción de CO₂ en ciruelas almacenadas a 20 °C durante 8 días. Otros autores también han observado que la aplicación de recubrimientos comestibles en frutas crean una barrera semipermeable a los gases (CO₂ y O₂) y reducen la intensidad respiratoria de las mismas (Falguera *et al.*, 2011; Vargas *et al.*, 2006; Li y Yu, 2001). Sin embargo, Navarro-Tarazaga (2007) no encontró alguna influencia en la aplicación de RC a base de HPMC con cera de abeja en ciruelas “Angelino”, resultado que coincide con el reportado en este trabajo.

Finalmente en el apéndice C, se muestran los resultados en conjunto de los parámetros de calidad y fisiológicos (respiración) de las ciruelas sometidas a los diferentes tratamientos.

6.2.3.2. Desórdenes Fisiológicos

El uso de la refrigeración es una forma de aumentar la vida de anaquel de las ciruelas, sin embargo, el almacenamiento prolongado a temperaturas bajas y/o el almacenamiento a temperatura ambiente pueden causar daños por frío o desórdenes fisiológicos en estas frutas, los cuales se presentan como pigmentación roja o “*bleeding*” en la pulpa, falta de jugosidad o harinosidad, transparencia o “*gel breakdown*” y pardeamiento. Cabe mencionar que aunque los síntomas de estos desórdenes pueden presentarse durante el almacenamiento prolongado a bajas temperaturas, estos se desarrollan más rápidamente cuando las frutas son expuestas a temperaturas mayores (ambiente) en la etapa posterior al almacenamiento en frío (Navarro-Tarazaga *et al.*, 2011; Candan, 2010; Manganaris *et al.*, 2008; Navarro-Tarazaga *et al.*, 2008; Crisosto *et al.*, 1999). El *bleeding* o pigmentación roja en la pulpa, es causado por la difusión de antocianinas o pigmentos rojos desde el hueso hacia toda la pulpa del fruto, esta pigmentación se debe a un proceso anormal de maduración y/o de senescencia en las ciruelas. Por otro lado, el ablandamiento de la pulpa causado por la degradación de la pared celular podría contribuir a aumentar la difusión de

las antocianinas en la pulpa y por lo tanto a su pigmentación (Navarro-Tarazaga 2007; Navarro-Tarazaga *et al.*, 2011).

El pardeamiento y la transparencia (*gel breakdown*) se presentan en la pulpa de la fruta sin afectar el aspecto externo de la misma. En la transparencia, la pulpa que rodea al hueso presenta una textura gelatinosa. Inicialmente se presenta una apariencia translúcida y vítrea que la mayoría de las veces se va oscureciendo. El desarrollo de la transparencia podría deberse a la formación de geles (los cuales resultan de la unión entre pectinas, iones y agua libre) en los espacios intercelulares. Además, las bajas temperaturas ayudarían a que los iones y fluidos celulares se unan a las pectinas formando geles, debido al incremento en la permeabilidad de las membranas (Candan *et al.*, 2008; Candan, 2010). En el pardeamiento interno la pulpa de las ciruelas presenta una coloración parda causada por la oxidación enzimática de polifenoles y taninos. La enzima polifenol-oxidasa, en presencia de oxígeno, cataliza la oxidación de varios compuestos, entre los que se encuentran los fenoles. Con las bajas temperaturas se incrementa la permeabilidad de las membranas permitiendo que la enzima interactúe con su sustrato, llevándose a cabo la reacción de oxidación y por lo tanto el pardeamiento interno de la fruta (Candan *et al.*, 2008; Candan, 2010).

Los desórdenes fisiológicos en este trabajo fueron; en menor medida, la presencia de pigmentación roja o “*bleeding*” y, en mayor medida el pardeamiento interno y la transparencia o “*gel breakdown*” de la pulpa, asociados a las bajas temperaturas de almacenamiento (Figuras 31, 32, 33 y 34). Los daños fisiológicos (“*bleeding*”, pardeamiento interno y “*gel breakdown*”) que se presentaron en las ciruelas durante la presente experimentación, aumentaron al prolongarse el tiempo de almacenamiento a 25 °C. El uso de RC redujo significativamente los daños por frío en las ciruelas y tras todo el periodo de almacenamiento, los frutos recubiertos presentaron un índice de “*bleeding*” promedio de 1.38 (más cercano a nulo (1) que a moderado (2), un pardeamiento interno y “*gel breakdown*” promedio de 3.38 y 3.88 (más cercano a ligero (3) para el primero y a moderado (4) para el segundo), en comparación con las ciruelas sin recubrir la cuales presentaron un “*bleeding*” moderado con un valor promedio de 2.08, un pardeamiento interno severo (5) y un “*gel breakdown*” de severo a extremo (5.5). El uso de RC es, en general, un método efectivo en reducir los daños por frío al final de 30 días de

almacenamiento a 1 °C y 6 días a 25 °C. Finalmente, sí se presentó una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las ciruelas sin recubrir y aquellas tratadas con RC, aunque no hubo ninguna diferencia significativa ($p > 0.05$) entre los RC utilizados en la reducción de la incidencia de los desórdenes fisiológicos presentados.

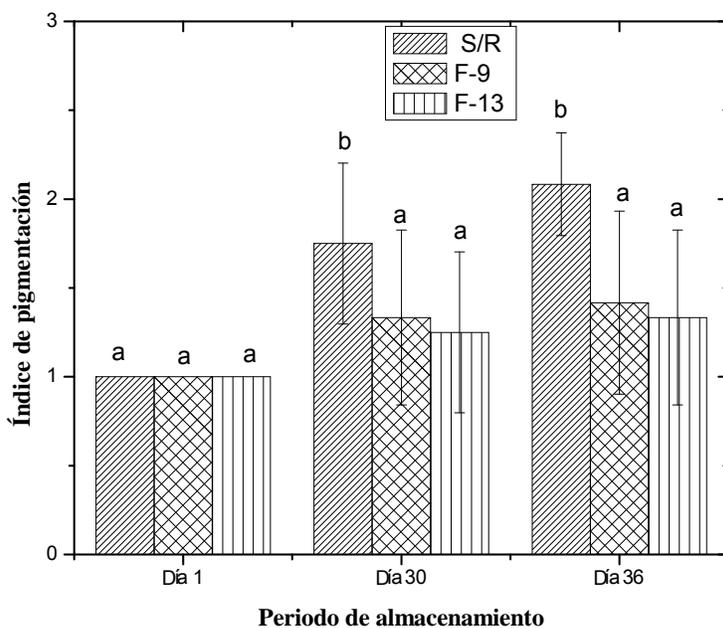


Figura 31. Evolución del índice de “bleeding” o pigmentación roja en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos, donde S/R=sin recubrimiento, F-9=1.5% de mucílago con 1% de gretina y F-13=0.5% de mucílago con 0.5% de gretina y 0.5% de cera de abeja. Las barras verticales representan la media de 20 frutos \pm SD.

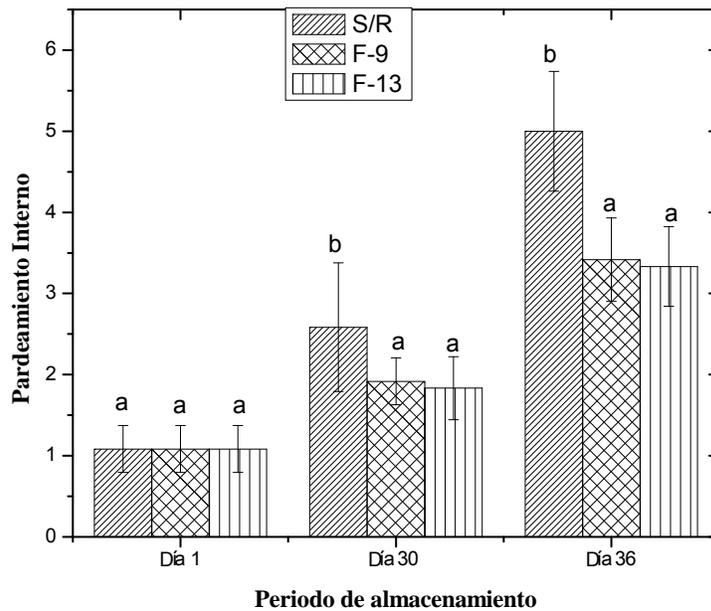


Figura 32. Evolución de la presencia de pardeamiento interno en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos, donde S/R=sin recubrimiento, F-9=1.5% de mucílago con 1% de gretetina y F-13=0.5% de mucílago con 0.5% de gretetina y 0.5% de cera de abeja. Las barras verticales representan la media de 20 frutos \pm SD.

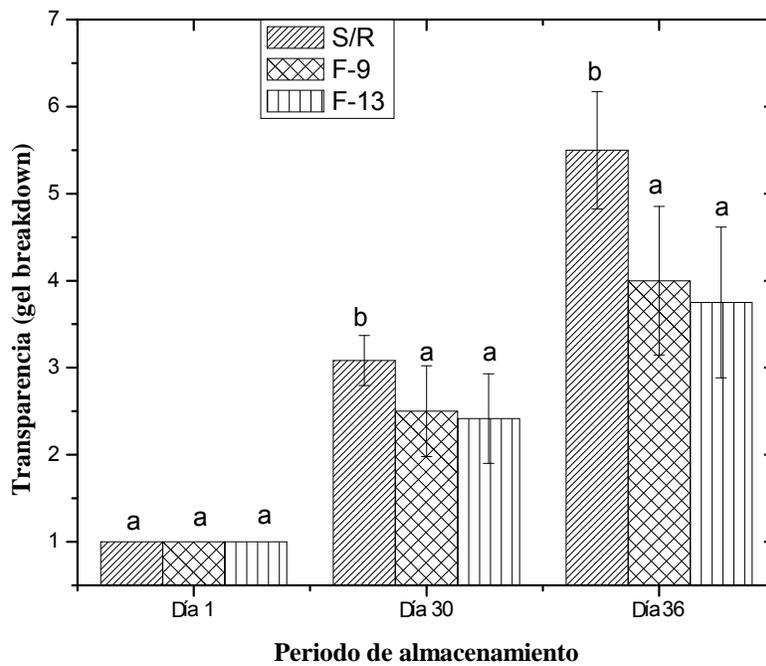


Figura 33. Evolución del Índice de transparencia (“gel breakdown”) en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos, donde S/R=sin recubrimiento, F-9=1.5% de mucílago con 1% de gretetina y F-13=0.5% de mucílago con 0.5% de gretetina y 0.5% de cera de abeja. Las barras verticales representan la media de 20 frutos \pm SD

El uso de RC disminuyó la incidencia de “bleeding”, pardeamiento y “gel breakdown” en las ciruelas lo que podría deberse a una modificación de la atmósfera interna producido por el recubrimiento (el cual presenta una barrera al CO₂ y O₂) que también resultó en una disminución del ablandamiento de la pulpa reflejado en una retención de la firmeza.

Días de almacenamiento	Tratamiento		
	S/R	F-9	F-13
0			
30			
36			

Figura 34. Evolución de la presencia de daños por frío en ciruelas sometidas a diferentes tratamientos a 1 °C durante 30 días más 6 días a 25 °C, donde S/R=sin recubrimiento, F-9=1.5% de mucílago con 1% de grenetina y F-13=0.5% de mucílago con 0.5% de grenetina y 0.5% de cera de abeja.

Los resultados obtenidos concuerdan con los obtenidos por Navarro-Tarazaga *et al.* (2011) y Navarro-Tarazaga *et al.* (2008) quienes reportan una reducción en la pigmentación roja o “bleeding” en ciruelas recubiertas con HPMC y cera de abeja en bajas concentraciones, en comparación con aquellos frutos sin recubrir y por Pérez-Gago *et al.* (2003) que señalan que la aplicación de RC a base de HPMC redujo significativamente el pardeamiento interno y la harinosidad en ciruelas.

7. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en el presente trabajo se concluye lo siguiente:

- Las formulaciones de las PC a base de mucílago de nopal en combinación con otros componentes (grenetina y cera de abeja) en mezclas binaria y/o terciaria a diferente concentración presentaron un efecto significativo ($p < 0.05$) en todas las propiedades; físicas (color, transparencia, espesor), de barrera (permeabilidad a vapor de agua, O₂ y CO₂) y mecánicas.

- El aumento en el número de componentes en la formulación, además de la adición de cera de abeja, contribuyó a un incremento en el espesor de las PC, siendo las elaboradas de mucílago de nopal con grenetina y cera de abeja las que presentaron el mayor espesor.

- El color y la transparencia de las PC fueron afectados por el número de componentes y su concentración, así como por la adición de cera de abeja, mostrándose la mayor luminosidad, *croma* y tono en películas con grenetina en comparación con aquellas con cera de abeja, las cuales presentaron la menor luminosidad y transparencia.

- La permeabilidad a vapor de agua se vio afectada por la composición de las películas y por la adición de cera de abeja, ya que ésta contribuyó a disminuir considerablemente la permeabilidad de las mismas. Sin embargo, el aumento en la concentración de la cera de abeja no disminuyó la permeabilidad de las películas, siendo las elaboradas con la menor concentración las que menor permeabilidad al vapor de agua presentaron, debido principalmente a que la distribución del lípido en la matriz polimérica no se dio de manera totalmente homogénea.

- La propiedades mecánicas (fuerza de fractura en la extensión y en la punción) de las PC se vieron afectadas por su formulación. El aumento en el contenido de grenetina, combinado con un alto contenido de mucílago de nopal, contribuyó a incrementar el esfuerzo de fractura en la extensión y punción en las películas. Por otro lado, la adición de cera de abeja disminuyó considerablemente las propiedades mecánicas de las películas a base de mucílago de nopal y grenetina, pues su adición produjo una estructura heterogénea

en las mismas, debido a que este componente interrumpe la continuidad de la matriz polimérica, produciendo puntos de fractura que disminuyen la resistencia a la tracción y punción. Las películas de mucílago de nopal con grenetina y cera de abeja presentaron los valores más bajos en los esfuerzos de fractura en la extensión y la punción.

- Las imágenes de microscopía electrónica de barrido de las películas elaboradas mostraron que la estructura de las mismas se vio afectada por su formulación, obteniéndose películas con apariencia suave y homogénea, aunque no más compacta, en formulaciones de uno y dos componente (grenetina y mucílago de nopal). Sin embargo, las películas con cera de abeja en su composición, aunque presentaron una apariencia más granulosa, su estructura fue más cerrada y compacta, hecho que influyó en propiedades como la permeabilidad al vapor de agua y a gases en donde estas películas presentaron resultados favorables.

- Las películas elaboradas a base de 0.5% mucílago de nopal con 0.5% de grenetina y 0.5% de cera de abeja (F-13) fueron las que presentaron los valores más bajos en permeabilidad a vapor de agua y a gases, además de obtener resultados aceptables en los parámetros de luminosidad, espesor y estructura microscópica, por lo que fueron las seleccionadas para ser aplicadas como RC en la conservación de la calidad poscosecha de ciruela (*Prunus salicina* L.) fresca proveniente del estado de Puebla. Sin embargo, de las películas elaboradas con dos componentes, las obtenidas a partir de 1.5% de mucílago de nopal con 1% de grenetina (F-9) presentaron valores de permeabilidad al vapor de agua, luminosidad y propiedades mecánicas aceptables, por lo que también fueron seleccionadas para el mismo fin.

- La aplicación de RC compuestos de mucílago de nopal, grenetina y cera de abeja contribuyó a disminuir los procesos de senescencia de la ciruela, ya que actuó como una barrera semipermeable al O₂ y CO₂, modificando la composición de los gases alrededor del fruto y funcionando de esta manera como una atmósfera modificada en la misma.

- Los recubrimientos compuestos de 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina y 0.5% de cera de abeja preservaron la calidad poscosecha de las ciruelas reduciendo la pérdida de peso y firmeza en las mismas. Sin embargo, su aplicación no ayudó a disminuir

la intensidad respiratoria, el aumento en sólidos solubles y a mantener el color adecuado para una buena calidad en estas frutas.

- La adición de cera de abeja y la proporción mucílago:grenetina:cera de abeja es el factor más importante que repercute en la conservación de la calidad poscosecha de ciruelas recubiertas.

- El uso de RC a base de mucílago de nopal, grenetina con y sin cera de abeja resultó ser un método efectivo que contribuyó a reducir los desórdenes fisiológicos (“bleeding”, pardeamiento interno y transparencia o “gel breakdown”) en ciruela (*Prunus salicina* L.), sin embargo, no hubo una diferencia significativa entre los dos recubrimientos utilizados.

- La calidad sensorial de las ciruelas disminuyó al aumentar el tiempo de almacenamiento. Al inicio del mismo, los consumidores consideraron que las ciruelas cubiertas y sin recubrir eran de *buena calidad*, para llegar a una calidad *aceptable* como límite de consumo después de 30 días de almacenamiento a 1 °C, en donde las ciruelas recubiertas con 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina y 0.5% de cera de abeja (F-13) se destacaron como aquellas que mejor calidad final presentaron a juicio de los consumidores.

- El impacto en la aceptabilidad de las ciruelas recubiertas depende principalmente de los materiales utilizados y la concentración de los mismos en la formulación de los RC. El uso de RC a base de 0.5% de mucílago de nopal, 0.5% de grenetina y 0.5% de cera de abeja reflejó efectos considerables en el análisis sensorial, mejorando la apariencia final de las ciruelas recubiertas, lo que tiene una implicación importante en la comercialización de este fruto, pues favorece la atracción por parte de los consumidores, por lo que la aplicación de RC en ciruela puede ser una alternativa tecnológica viable para la comercialización de esta fruta.

8. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados presentados se hacen las siguientes recomendaciones:

7. Evaluar diferentes métodos de extracción del mucílago de nopal de forma experimental y analizar los rendimientos de cada metodología, además de hacer un análisis de su composición química.
8. Estudiar otros estados de madurez del nopal, además de otras variedades.
9. Utilizar otros componentes (diferentes hidrocoloides y lípidos) en combinación con el mucílago de nopal para caracterizar el comportamiento de las películas obtenidas.
10. Evaluar otras metodologías para la elaboración de la dispersión o emulsión formadora de películas, asimismo, la adición de lípidos exige hacer una caracterización de las emulsiones (determinación de tamaño de partícula y estabilidad, principalmente).
11. Evaluar por métodos microbiológicos la capacidad antimicrobiana del aceite esencial de tomillo en los recubrimientos comestibles aplicados a la ciruela.
12. Evaluar el contenido de CO₂ y O₂ interno en los frutos recubiertos, además del etanol y acetaldehído en zumo.
13. Evaluar el índice de desprendimiento de los RC aplicados.
14. Con base en la caracterización obtenida, evaluar la aplicación como RC en diferentes frutos de interés comercial en México de las diferentes películas obtenidas en el presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdi, N., Holford, P., Mc Glasson, M. B. (1997). Effects of harvest maturity on the storage life of Japanese type plums. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 37: 391-397.
- Abugoch, L E., Tapia, C., Villamán, M.C., Yazdani-Pedram, M y Díaz-Dosque, M. (2011). Characterization of quinoa protein chitosan blend edible films. *Food Hydrocolloids*, 25: 879-886.
- Abraján-Villaseñor, M.A. (2008). Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Al-Hassan, A.A. y Norziah, M.H. (2012). Starch gelatin edible films: Water vapor permeability and mechanical properties as affected by plasticizers. *Food Hydrocolloids*, 3: 1-10.
- Ames, B. N., Gold, L. S., Willett, W. C. (1995). The causes and prevention of cancer. *Proc Natl Acad Sci, USA*. 92:5258-65.
- Andreuccetti, C., Carvalho, R. A., Galicia-Garcia, T., Martínez-Bustos, F., Grosso, C. R. F. (2011). Effect of surfactants on the functional properties of gelatin-based edible films. *Journal of Food Engineering*, 103 (2): 129-136.
- AOAC. (1990). Official methods of analysis of the association of official analytical chemists, food composition; additives; natural contaminants. Volumen II, The association of official analytical chemist. 15^a ed. Inc. Arlington, Virginia, USA. pp. 1298.
- ASERCA. Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria. (2011). Nopal y Tuna, una mirada a su realidad actual. *Revista Claridades Agropecuarias*, 213: 3-12.
- ASERCA. Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria. (2002a). De nuestra cosecha. Situación actual de la Ciruela en México, *Revista Claridades Agropecuarias*, 100: 3-19.

-
- ASERCA. Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria. (2002b). Más allá de nuestro campo: La ciruela, una de las frutas más antiguas del mundo. *Revista Claridades Agropecuarias*, 100: 20-29.
- Arizmendi-Cotero, D. (2004). Optimización de dos compuestos plastificantes (glicerol y polietilenglicol) en la elaboración de una película plástica comestible obtenida a partir del mucílago de nopal de la especie *Opuntia tomentosa Salm-Dyck*. Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- ASTM D618-00 (2003). Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing. Vol. 8.01, pp. 36-39.
- ASTM D882-97 (2003). Standard Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. Vol. 8.01, pp. 163-171.
- ASTM E96-00 (2003). Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials E 96-80. Vol. 4.06, pp. 868-876.
- Atarés, L., Bonilla, J. y Chiralt, A. (2010). Characterization of sodium caseinate-based edible films incorporated with cinnamon or ginger essential oils. *Journal of Food Engineering*, 100: 678–687.
- Avena-Bustillos, R. J. y Krochta, J. M. (1993). Water Vapor Permeability of Caseinate-Based Edible Films as Affected by pH, Calcium Crosslinking and Lipid Content. *Journal of Food Science*, 58: 904-907.
- Avena-Bustillos, R. y McHugh, T. H. (2012). Role of edible film and coating additives. En: Baldwin, E. A. Cap. 6. *Edible Coatings and Films to Improve Food Quality*. 2nd Edition. Boca Raton,FL:CRC Press. pp. 157-177.
- Bai, J. y Plotto, A. (2012). Coatings for fresh fruits and vegetables. En: Baldwin, E.A.,Hagenmaier, R.,Bai, J. (eds). *Edible Coatings and Films to Improve Food Quality*. 2nd edition. Boca Raton,FL:CRC Press. pp.185-242.

-
- Baldwin, E.A. (1994). Edible coatings for fresh fruits and vegetables: Past, present, and future. En: Krochta, J. M., Baldwin, E. A., and M.O. Nisperos-Carriedo (eds.). Edible Coating and Films to Improve Food Quality. Technomic, Lancaster, PA. pp. 25–64
- Baldwin, E. A. (2007). Surface Treatments and Edible Coatings in Food Preservation. En: Rahman S. M. (ed.). Handbook of Food Preservation. 2nd Edition. Taylor & Francis Group, Boca Raton, LLC. pp. 477-508.
- Baldwin, E. A. y Hagenmaier, R. D. (2012). Introduction. In: Baldwin E.A. (ed.) Edible Coatings and Films to Improve Food Quality. 2nd edition. Boca Raton, FL:CRC Press. pp. 1-12.
- Baldwin, E. A., Nisperos-Carriedo, M. O. y Baker, R. A. (1995). Use of edible coatings to preserve quality of lightly (and slightly) processed products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 35 (6); 509-524.
- Barkai-Golan, R. (2001). Postharvest Diseases of Fruits and Vegetables. Development and Control. Postharvest disease summary four fruit groups II. Elsevier Science. Amsterdam, The Netherlands. 2: 293-303.
- Basiouny, F. M. y Baldwin, E. A. (1997). The use of liquid coating compounds as postharvest application to plum fruits. *Proc Fla State Hort Soc.* 110: 219–22.
- Benson, L. D. (1962). *Plant taxonomy: methods and principles*. Ronald Press. New York.
- Bertan, L.C., Tanada-Palmu, P.S., Siani, A.C. y Grosso, C.R.F. (2005). Effect of fatty acids and ‘Brazilian elemi’ on composite films based on gelatin. *Food Hydrocolloids*, 19: 7382.
- Biquet, B. y Labuza, T.P. (1988). Evaluation of the moisture permeability of chocolate films as edible moisture barrier. *Journal of Food Science*, 53: 989-991.
- Block, G., Patterson, B., Subar, A. (1992). Fruit, vegetables and cancer prevention: A review of the epidemiological evidence. *Nutr. Cancer*. 18: 1–29.
- Bósquez-Molina, E. (2003). Elaboración de recubrimientos comestibles formulados con goma de mezquite y cera de candelilla para reducir la cinética de deterioro en fresco del limón

persa (*Citrus latifolia Tanaka*). Tesis Doctoral en Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Bosquez-Molina, E., Ronquillo-de Jesús, E., Bautista-Baños, S., Verde-Calvo, J.R. y Morales-López J. (2010). Inhibitory effect of essential oils against *Colletotrichum gloeosporioides* and *Rhizopus stolonifer* in stored papaya fruit and their possible application in coatings. *Postharvest Biology and Technology*, 57: 132–137.

Bourtoom, T. (2008). Edible films and coatings: characteristics and properties. *International Food Research Journal*, 15 (3): 1-12.

Bravo, H. (1978). Las cactáceas de México. UNAM, México.

Candan, A. P. (2010). Mantenimiento de la calidad postcosecha y mejora del almacenamiento frigorífico de ciruelas japonesas mediante la aplicación de tratamientos con 1-metilciclopropano. Tesis Doctoral en Ing. Agronómica. Universidad de Lleida, España.

Candan, A. P., Graell, J., Larrigaudiere, C. (2008). Roles of climacteric ethylene in the development chilling injury in plums. *Postharvest Biology and Technology*, 47: 107–112.

Cano y Cano, G., Marroquín de la Fuente, J. (1994). Taxonomía de plantas superiores. Trillas, México.

Cárdenas, A., Goycoolea, F.M. y Rinauto, M. (2008). On the gelling behavior of nopal (*Opuntia ficus-indica*) low methoxyl pectin. *Carbohydrate Polymers*, 73: 212-222.

Cárdenas, A., Higuera-Ciapara, I. y Goycoolea, F.M. (1997). Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage in solution. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 2: 152–157.

Chauhan, O.P., Raju, P.S., Singh, A. y Bawa, A.S. (2011). Shellac and aloe-gel-based surface coatings for maintaining keeping quality of apple slices. *Food Chemistry*, 126: 961–966.

Chen, Z. y Zhu C. (2011). Combined effects of aqueous chlorine dioxide and ultrasonic treatments on postharvest storage quality of plum fruit (*Prunus salicina* L.). *Postharvest Biology and Technology*, 61: 117-123.

-
- Cisneros-Zevallos, L., J.M. Krochta. (2003). Dependence of coating thickness on viscosity of coating solution applied to fruits and vegetables by dipping method. *J. Food Sci.* 68 (2): 503-510.
- Coughlan, K.; Shaw, N. B.; Kerry, J.F. Kerr, J.P. (2004). Combined Effects of Proteins and Polysaccharides on Physical Properties of Whey Protein Concentrate-based Edible Films. *Journal of Food Science*, 69 (6): E271-E275.
- Crisosto, C. H., Mitcham, E. J. y Kader A. A. (2002). Plum: Recommendations for maintaining postharvest quality. Davis, California. University of California, Davis. Fecha de consulta. 25/02/13. Disponible en: <http://postharvest.ucdavis.edu/Produce/ProduceFacts/Fruit/plums.shtml>.
- Crisosto, C.H., Mitchell, F. G. y Zhiguo, J. (1999). Susceptibility to chilling injury of peach, nectarine, plum cultivars grown in California. *Hort. Sci.* 34: 1116-8.
- Dangaran, K., Tomasula, P. M. y Qi, P. (2009). Structure and function of protein-based edible films and coatings. En; Embuscado, M.E. y Huber, K. C. (eds.). *Edible Films and Coatings for Food Applications*. Springer Science and Business Media, LLC. pp. 295.
- Dávila-Aviña, J. E. J., Villa-Rodríguez, J., Cruz-Valenzuela, R., Rodríguez-Armenta, M., Espino-Díaz, M., Ayala-Zavala, J. F., Olivas-Orozco, G. I., Heredia, B. y González-Aguilar, G. (2011). Effect of Edible Coatings, Storage Time and Maturity Stage on Overall Quality of Tomato Fruits. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 6 (1): 162-171.
- Debeaufort, F., Quezada-Gallo J. A. y Voilley A. (1998). Edible Films and Coatings: Tomorrow's Packagings: A Review, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 38 (4): 299-313.
- Debeaufort, F., Voilley, A. (1995). Effect of surfactants and drying rate on barrier properties of emulsified edible films. *Int. J. Food Sci. Technol.* 30:183-190.
- De Carvalho, R. A. y Grosso, C. R. F. (2004). Characterization of gelatin based films modified with transglutaminase, glyoxal and formaldehyde. *Food Hydrocolloids*, 18 (5): 717-726.

-
- Del-Valle V., Hernández-Muñoz P., Guarda A., Galotto M.J. (2005). Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*fragaria ananassa*) shelf-life. *Food Chemistry*, 91: 751-756.
- Díaz-Mula, H. M., Zapata, P. J., Guillén, F., Martínez-Romero, D., Castillos, S., Serrano, M., Valero, D. (2009). Changes in hydrophilic and lipophilic antioxidant activity and related bioactive compounds during postharvest storage of yellow and purple plum cultivars. *Postharvest Biology and Thechnology*, 51 (3): 354-363.
- Díaz-Mula, H. M., Zapata, P. J., Guillén, F., Valverde, J. M., Valero, D. y Serrano, M. (2011). Modified atmosphere packaging of yellow and purple plum cultivars. Effect on bioactive compounds and antioxidant activity. *Postharvest Biology and Technology*, 61 (2-3): 110-116.
- El Ghaout, A., Arul, J., Ponnampalam, R. y Boulet, M. (1991). Chitosan coating effect on storability and quality of fresh strawberry. *Journal of Food Science*, 56: 1618-1622.
- Embuscado, M. E. y Huber K. C. (2009). *Edible Films and Coatings for Food Applications*. Springer Science y Business Media, LLC. pp. 410.
- Espino-Díaz M., Ornelas-Paz J., Martínez-Télez M., Santillán C., Barbosa-Cánovas G., Zamudio-Flores P. B. y Olivas Guadalupe I. (2010). Development and Characterization of Edible Films Based on Mucilage of *Opuntia ficus-indica* (L.). *Journal of Food Science*, 75: 347-352.
- Eum, L. H., Keun Hwang, D., Linke, M., Koo Lee, S. y Zude, M. (2009). Influence of edible coating on quality of plum (*Prunus salicina* Lindl. cv. 'Sapphire'). *Eur Food Res Technol.* 229: 427–434.
- Fabra, M. J., Talens, P., Chiralt, A. (2008). Tensile properties and water vapor permeability of sodium caseinate films containing oleic acid-beeswax mixtures. *Journal of Food Engineering*, 85 (3): 393-400.

-
- Fabra, M. J., Talens, P., Chiralt, A. (2009). Microstructure and optical properties of sodium caseinate films containing oleic acid–beeswax mixtures. *Food Hydrocolloids*, 23 (3): 676-683.
- Fakhoury F.M., Martelli S.M., Bertan L.C., Yamashita F., Innocentini Mei L.H., Collares Queiroz F.P. (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* 49:149-154.
- Fakhreddin-Hosseini, S., Rezaei, M., Zandi, M., Ghavi, F. F. (2013). Preparation and functional properties of fish gelatin-chitosan blend edible films. *Food Chem.*136: 3-4.
- Falguera, V., Quintero, J.P., Jiménez, A., Aldemar, M.J. y Ibarza, A. (2011). Edible films and coatings: Structures, active functions and trends in their use. *Trends in Food Science and Technology*, 22: 292-303.
- Flores, V. C.A. (2001). Producción, industrialización y comercialización de Nopalitos. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y de la Agricultura Mundial (CIESTAAM). México. pp. 125.
- Flores, V.C.A. y Olvera, M.J. (1994). El sistema producto nopal verdura en México. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y de la Agricultura Mundial (CIESTAAM). México. pp. 149.
- Garti, N. (1999). Hydrocolloids as emulsifying agents for oil in-water emulsions. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 20: 327-355.
- Gennadios, A. y Weller, C. L. (1993). Temperature Effect on oxygen Permeability of Edible Protein-based Films. *Journal of Food Science*, 58: 212-214.
- Ghasemloua, M., Khodaiyana, F. y Oromiehieb, A. (2011). Physical, mechanical, barrier, and thermal properties of polyol-plasticized biodegradable edible film made from kefiran. *Carbohydrate Polymers*, 84: 477–483.

-
- Gijón-Arreortúa, I. (2010). Propiedades de formación de películas de mezclas -carragenina-quitosano en relación con sus propiedades viscoelásticas. Tesis de Maestría en Ingeniería, UNAM, México.
- Goncalves, F. P., Martins, M. C., Silva Junior, G. J., Lourenco, S. A., Amorim, L. (2010). Postharvest control of brown rot and *Rhizopus* rot in plums and nectarines using carnauba wax. *Postharvest Biology and Technology*, 58: 211–217.
- Gontard, N., Guilbert, S. y Cuq, J.L. (1993). Water and Glycerol as Plasticizers Affect Mechanical and Water Vapor Barrier Properties of an Edible Wheat Gluten Film. *Journal of Food Science*, 58 (1): 206-211.
- Gontard, N. y Guilbert, S. (1994). Biopackaging technology and properties of edible and/or biodegradable material of agricultural origin. En: Mathlouthi M., (ed.). *Food packaging and preservation*. Blackie Academic and Professional, London. pp. 159.
- Gorris, L. G., Guilbert, S. y Gontard, N. (1996). Prolongation of the Shelf-life of Perishable Food Products using Biodegradable Films and Coatings. Review Article. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 29:10–17.
- Goycoolea, F.M., Cárdenas, A., Hernández, G., Lizardi, J., Álvarez, G., Soto, F.J., Valdez, M., Rinaudo, M., Milas, M. y Hernández, J. (2000). Polisacáridos Aislados del Mezquite y otras Plantas del Desierto. *Memorias del II Simposium Internacional sobre la Utilización y Aprovechamiento de la Flora Silvestre de Zonas Áridas*. Hermosillo, Sonora, México. pp. 245–260.
- Granados Sánchez, D. y Castañeda Pérez, A.D. (2000). El nopal. *Historia, Fisiología, Genética e Importancia frutícola*. Trillas. México.
- Greener, D.I. y Fennema, O. (1994). Edible Films and Coatings: Characteristics, Formation, Definitions and Testing Methods. En: Krochta, J.M., Baldwin E. A., Nisperos-Carriedo M. (eds.). *Edible Coatings and Films to Improve Food Quality*. Technomic, Lancaster, Pensilvania, USA. pp. 1-21.

-
- Griffith, M.P. (2004). The origins of an important cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactácea): new molecular evidence. *American Journal of Botany*, 91(11): 1915-1921.
- Guilbert, S., Gontard, N. y Gorris, G.M. (1996). Prolongation of the shelf-life of perishable food products using biodegradable films and coatings. *Lebensm-Wiss. u.- Technol.* 29: 10-17.
- Habibi, Y., Mahrouz, M. y Vignon, M.R. (2005). Isolation and structural characterization of protopectin from the skin of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruits. *Carbohydrate Polymers*, 60: 205-213.
- Hagenmaier, R.D. y Baker, R.A. (1993). Reduction in gas exchange of citrus fruit by wax coatings. *J. Agr. Food Chem.* 41: 283-287.
- Hagenmaier, R.D. y Shaw, P.E. (1992). Gas Permeability of Fruit Coating Waxes. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117: 105-109.
- Hall, D. J. (2012). Edible coatings from lipids, waxes and resins. En: Baldwin E. A. (ed.). *Edible Coatings and Films to Improve Food Quality*. 2nd Edition. pp. 79-98.
- Han J, H. and Gennadios, A. (2005). Edible films and coatings: A review. Elsevier Ltd. 239–262.
- Hansmann, C. F., Combrink, J. C. (2003). Plums and related fruits. En: Caballero B. (ed.). *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, Academic Press, Oxford. pp: 4606-4610.
- Hui. Y. J. (2006). *Handbook of fruits and fruit processing*. Blackwell Publishing. United States of America. pp. 519-531.
- Imran, I., El-Fahmy, S., Revol-Junelles, A.M. y Desobry, S. (2010). Cellulose derivative based active coatings: Effects of nisin and plasticizer on physico-chemical and antimicrobial properties of hydroxypropyl methylcellulose films. *Carbohydrate Polymers*, 81: 219–225.
- Jin-Park, H, (1999). Development of advanced edible coatings for fruits. *Trends in Food Science & Technology*, 10: 254-260.

-
- Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P. y Chiralt, A. (2010). Effect of lipid self-association on the microstructure and physical properties of hydroxypropyl-methylcellulose edible films containing fatty acids. *Carbohydrate Polymer*, 82(3): 585-593.
- Kader, A. A. (1986). Biochemical and physiological basis for effects of controlled and modified atmospheres on fruits and vegetables. *Food Technology*, 40 (5): 99–104.
- Kays S. J., Paull, R. E. (2004). Stress in harvested products. *Postharvest Biology*. Exon Press, Athens, GA. pp.355–414.
- Kester J. J. y Fennema, O. (1986). Edible Films and Coating: A Review. *Food Technology*, 40: 47-57.
- Krochta, J., Baldwin, E. y Nisperos-Carriedo, M. (1994). Edible coatings and films to improve food quality. Technomic Publishing Company, New York. pp.1344.
- Krochta, J. M., De Mulder-Johnston, C. (1997). Edible and biodegradable polymer films: challenges and opportunities. *Food Technology*, 51: 61-77.
- Labra, M., Grassi, F., Bardini, M., Imazio, S., Guiggi, A., Citterio, S., Banfi, E. y Sgorbati, S. (2003). Genetic relationships in *Opuntia Mill* genus (Cactaceae) detected by molecular market. *Plant Science*, 165: 1129-1136.
- Lacroix, M. (2009). Mechanical and Permeability Properties of Edible Films and Coatings for Food and Pharmaceutical Applications. En: Embuscado M. E. and Huber K.C. (eds). *Edible Films and Coatings for Food Applications*. Springer Science and Business Media, LLC. pp. 347-367.
- Larrigaudière, C., Candan, A.P., Ubach, D., Graell, J. (2009). Physiological response of ‘Larry Ann’ plums to cold storage and 1-MCP treatment. *Postharvest Biol. Technol.* 51: 56–61.
- León-Martínez, F.M., Méndez-Lagunas, L.L. y Rodríguez-Ramírez, J. (2010). Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): Effects on powder properties and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 81: 864–870.

-
- Li, H. y Yu, T. (2001). Effect of chitosan on incidence of brown rot, quality and physiological attributes of postharvest peach fruit. *J. Sci. Food Agr.* 81(2): 269-274.
- Lin, D. y 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.
- Limpisophon, K., Tanaka, M. y Osako, K. (2010). Characterisation of gelatin–fatty acid emulsion films based on blue shark (*Prionace glauca*) skin gelatin. *Food Chemistry*, 122 (4): 1095-1101.
- Lira-Vargas A. A. (2012). Caracterización de películas biodegradables a base de mucílago de nopal (*Opuntia Spp.*) y su empleo como recubrimiento en chirimoya y nectarina mínimamente procesada. Maestría en Ciencias en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria. Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Lazaridou, A., Biliaderis, C.G. y Kontogiorgos, V. (2003). Molecular weight effects on solution rheology of pullulan and mechanical properties of its films. *Carbohydr Polym* 52:151–66.
- Lobo, O. R. (1997). Principios de Transferencia de masa. Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- Luo, Z., Xie, J., Xu, T., Zhang, L. (2009). Delay ripening of ‘Qingnai’ plum (*Prunus salicina* Lindl.) with 1-methylcyclopropene. *Plant Sci.* 177: 705–709.
- Ma Wen, Chuan-He Tang, Shou-Wei Yin, Xiao-Quan Yang, Qin Wang, Fu Liu, Zi-Hao Wei. (2012). Characterization of gelatin-based edible films incorporated with olive oil. *Food Research International*, 40-1: 572-579.
- McGuire, G. (1992). Reporting of objective color measurements. *Hort Science*, 27: 1254-1255.
- Maftoonazad, N., Ramaswamy, H.S., Moalemiyan, M. y Kushalappa, A.C. (2007). Effect of pectin-based edible emulsion coating on changes in quality of avocado exposed to *Lasiodiplodia theobromae* infection. *Carbohydrate Polymers*, 68: 341-349.

-
- Majdoub, H., Roudesli, S. y Deratani, A. (2001a). Polysaccharides from prickly pear peel and nopals of *Opuntia ficus-indica*: extraction, characterization and polyelectrolyte behaviour. *Polymer International*, 50: 552-560.
- Majdoub, H., Roudesli, S., Picton, L., Le Cerf, D., Muller, G. y Grisel, M. (2001b). Prickly pear nopal pectin from *Opontia ficus-indica* physico-chemical study in dilute and semidilute solutions. *Carbohydrate Polymers*, 46: 69-79.
- Manganaris, G. A., Vicente, A. R., Crisosto, C. H. y Lavabitch, J. M. (2008). Effect of delayed storage and continuous ethylene exposure on flesh reddening of 'Royal Diamond' plums. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 8 (12): 2180-2185.
- Martín-Belloso, O., Rojas-Graü, M. A. y Soliva-Fortuny, R. (2009). Delivery of flavor and active ingredients using edible films and coatings. En: Embuscado M.E. and Huber K.C. (eds.). *Edible Films and Coatings for Food Applications*. London. pp.295.
- Mau-Chang Chen, Gene Horng-Chin Yeh and Benn-Huang Chiang. (1996). Antimicrobial and Physicochemical Properties of Methylcellulose and Chitosan Films Containing a Preservative. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20: 379-390.
- McHugh, T. H. (2000). Protein-lipid interactions in edible films and coatings. *Nahrung*. 44: 148-151.
- McHugh, T.H y Krochta, J.M. (1994a). Sorbitol vs glycerol plasticized whey protein edible films: integrated oxygen permeability and tensile property evaluation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42: 841-850.
- McHugh, T.H y Krochta, J.M. (1994b). Milk-protein-based edible films and coatings. *Food Technology*, 48: 97-103.
- Medina-Torres, L. (2005). Estudio reológico del mucílago de nopal y sus efectos sinérgicos con otros hidrocoloides de uso alimenticio. Tesis Doctoral en Ciencias, UNAM, México.
- Medina-Torres, L., Brito-de la Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B. y Alonso, S. (2003). Mechanical properties of gel formed by mixtures of mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*) and carrageenans. *Carbohydrate Polymers*, 52: 143-150.

-
- Medina-Torres L., Brito-De La Fuente E., Torrestiana-Sanchez B., Katthain R. (2000). Rheological properties of mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloids*, 14:417-424.
- Mei-Yun Z., Li Mei, Shi-Ming, Z. (2009). Effect of chitosan complex film on the quality of fresh-cut plum and its formula selection. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 4:375-378.
- Miller, K.S. y Krochta, J. M. (1997). Oxygen and aroma barrier properties of edible films: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 8 (7): 228-237.
- Menniti, A. M., Donati, I., Gregori, R. (2006). Responses of 1-MCP application in plums stored under air and controlled atmospheres. *Postharvest Biol. Technol.* 39: 243–246.
- Monedero, F. M., Fabra, M. J., Talens; P. Chiralt, A. (2009). Effect of oleic acid–beeswax mixtures on mechanical, optical and water barrier properties of soy protein isolate based films. *Journal of Food Engineering*, 91 (4): 509-515.
- Muñoz, L. A., Aguilera, J. M., Rodriguez-Turienzo, L., Cobos, A. y Díaz, O. (2012). Characterization and microstructure of films made from mucilage of *Salvia hispanica* and whey protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, 111 (3): 511-518.
- Murillo-Martínez, M.M., Pedroza-Islas, R., Lobato-Calleros, C., Martínez-Ferez, A. y Vernon-Carter, E.J. (2011). Designing W1/O/W2 double emulsions stabilized by protein-polysaccharide complexes for producing edible films: Rheological, mechanical and water vapour properties. *Food Hydrocolloids*, 25: 577-585.
- Navarro-Tarazaga, M. Ll. (2007). Efecto de la composición de recubrimientos comestibles a base de hidroxipropilmetilcelulosa y cera de abeja en la calidad de ciruelas, naranjas y mandarinas. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Navarro-Tarazaga, M. Ll., Massa, A., Pérez-Gago, M. B. (2011). Effect of beeswax content on hydroxypropyl methylcellulose-based edible film properties and postharvest quality of coated plums (*Cv. Angeleno*). *LWT - Food Science and Technology*, 44: 2328-2334.

-
- Navarro-Tarazaga, M., Pérez-Gago M., Del Rio M.A., (2004). Efecto of hydroxypropyl methylcellulose-beeswax edible composite coatings on *Angeleno* Plum quality during storage. *Acta Horticulture*, 682: 1089-1096.
- Navarro-Tarazaga, M. Ll., Sothornvit, R., Pérez-Gago, M. B. (2008). Effect of plasticizer type and amount on hydroxypropyl methylcellulose-beeswax edible film properties and postharvest quality of coated plums (*cv. Angeleno*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56: 9502-9509.
- Navarro-Tarazaga, M. Ll., Valencia-Chamorro, S., Pérez-Gago, M. B. (2007). Efecto de la temperatura de almacenamiento y la aplicación de recubrimientos comestibles en la calidad postcosecha de ciruelas *cv. "Sungold" y "Angeleno"*. V Congreso Latinoamericano de Tecnología Postcosecha y Agroexportaciones. Valencia, España.
- Nobel, P. S. (2002). *Cacti: biology and uses*. University of California Press. pp. 290.
- Nussinovitch, A. (2009). *Biopolymer Films and Composite Coatings*. En: Ebnesajjad S. (ed.). *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics*. Elsevier. Oxford, UK.
- Olarte, C., Sanz, S., Echavarría, J.F. y Ayala, F. (2009). Effect of plastic permeability and exposure to light during storage on the quality of minimally processed broccoli and cauliflower. *Food Science and Technology*, 42: 402–411.
- Olivas, G. I. y Barbosa-Cánovas, G. (2009). *Edible Films and Coatings for Fruits and Vegetables*. En: M.E. Embuscado and K.C. Huber (eds.), *Edible Films and Coatings for Food Applications*. Springer Science and Business Media, LLC. pp. 211-244.
- OLX. (2013). *Venta de Nopal de primera calidad*. Consultado: Marzo-2013. Disponible en: <http://queretarocity.olx.com.mx/vendo-nopal-tequisquiapan-queretaro-iid-106810728>.
- Osés, J., Fabregat-Vázquez, M., Pedroza-Islas, R., Tomás, S.A., Cruz-Orea, A. y Maté, J.I. (2009). Development and characterization of composite edible films based on whey protein isolate and mesquite gum. *Journal of Food Engineering*, 92: 56–62.
- Paliyath, G., Murr, D. P. (2008). *Common Fruits, Vegetables, Flowers, and Their Quality Characteristics*. En: Paliyath, G., Murr, D., Handa A. K., Lurie, S. (eds.). *Postharvest*

biology and technology of fruits, vegetables, and flowers. Wiley-Blackwell Publishing. Iowa, USA.

Pao, S., C.L. Davis, D.F. Kelsey, and P.D. Petracek. (1999). Sanitizing effects of fruit waxes at high pH and temperature on orange surfaces inoculated with *Escherichia coli*. J Food Sci. 64: 359–362.

Paredes López, O. Guevara Lara F. y Bello Pérez, L. A. 2006. Los alimentos mágicos de las culturas indígenas mesoamericanas. Colección la Ciencia para todos. Fondo de Cultura Económica. México. pp. 104-113

Paredes-Martínez E. (2011). Establecimiento de las condiciones de centrifugación para la obtención de mucílago de nopal deshidratado. Tesis en Ingeniería en Alimentos. UNAM, México.

Park, H.J., Weller, C.L, Vergano, P.J. y Testin R.F. (1993). Permeability and mechanical properties of cellulose-based edible films. J Food Sci 58:1361–4.

Payasi, A., Sanwal, G. G. (2010). Ripening of climacteric fruits and their control. Journal of Food Biochemistry, 34: 679–710.

Pereda, M., Amica, G., Marcovich, N. E. (2012). Development and characterization of edible chitosan/olive oil emulsion films. Carbohydrate Polymers, 87 (2): 1318-1325.

Pérez-Gago, M. B. (2012). Protein-based films and coatings. In: Baldwin E. A. (ed.). Edible Coatings and Films to Improve Food Quality. 2nd Edition. Boca Raton, USA. pp. 14-58.

Pérez-Gago, M.B. y Krochta, J.M. (2001). Lipid particle size effect on water vapor permeability and mechanical properties of whey protein/beeswax emulsion films. Journal Agriculture Food Chemistry, 49: 996-1002.

Pérez-Gago, M. B. y Krochta, J. M. (2005). Emulsion and bilayer edible films. En: Han, J. H. (ed.) Innovations in Food Packaging. pp. 384-402.

-
- Pérez-Gago M.B., Rojas C., Del Rio M.A. (2003). Effect of hydroxypropyl methylcellulose-lipid edible composite coatings on plum (*cv.Autumn giant*) quality during storage. *Journal of Food Science: Food Chemistry and Toxicology*, 68: 879-883.
- Pimienta, E. (1990). *El nopal Tunero*. Universidad de Guadalajara. México.
- Pires, C.; Ramos, G.; Teixeira, I.; Batista, R.; Mendes, L.; Nunes, A. y Marques, J. (2011). Characterization of biodegradable films prepared with hake proteins and thyme oil. *Journal of Food Engineering*, 105: 422–428.
- Pires, C., Ramos, C., Teixeira, B., Batista, I. Nunes, M. L. y Marques, A. (2013). Hake proteins edible films incorporated with essential oils: Physical, mechanical, antioxidant and antibacterial properties. *Food Hydrocolloids*, 30 (1): 224-231.
- Plotto, A., Roberts, D.D. y Roberts, R.G. (2003). Evaluation of plant essential oils as natural postharvest disease control of tomato (*Lucopersicon esculentum*). *Acta Horticulturae*, 628:737-745.
- Quezada-Gallo. J.A., Debeaufort, F., Callegarin, F. y Voilley, A. (2000). Lipid hydrophobicity, physical state and distribution effects on the properties of emulsion-based films. *J. Membrane Sci.* 180:37-46.
- Ramos-García, M. L., Bautista-Baños, S., Barrera-Necha, L. L., Bosquez-Molina, E., Alia-Tejagal, I., Estrada-Carrillo, M. (2010). Compuestos Antimicrobianos Adicionados en Recubrimientos Comestibles para Uso en Productos Hortofrutícolas. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 28 (1): 44-57.
- Reinoso, E., Mittal, G. S. y Loong-Tak Lim. (2008). Influence of Whey Protein Composite Coatings on Plum (*Prunus Domestica* L.) Fruit Quality. *Food Bioprocess Technology*, 1:314–325.
- Rhim, J. W. y Thomas H. Shellhammer, T. H. (2005). Lipid-based edible films and coatings. In: Jung H. Han (ed.). *Innovations in Food Packaging*. Elsevier Ltd. London, UK. pp. 362-383.

-
- Rico-Peña, D.C. y Torres, J.A. (1991). Sorbic acid and potassium sorbate permeability of an edible methylcellulose-palmitic acid film: water activity and pH effects. *Journal of Food Science*, 56: 497-501.
- Ríos, R. J. y Quintana, M.V. (2004). Manejo general del cultivo del nopal. Manual del participante. Colegio de Posgraduados-Montecillos, México. pp. 81.
- Rojas-Graü, M.A., R.J., Avena-Bustillos, M., Friedman, P.R., Henika, O. Martín-Belloso y T.H. McHugh. (2006). Mechanical, barrier, and antimicrobial properties of apple puree edible films containing plant essential oils. *J Agric Food Chem*. 54: 9262–9267.
- Rojas-Graü, M. A., Tapia, M. S., Rodríguez, F. J., Carmona, A. J., Martín-Belloso, O. (2007). Alginate and gellan based edible coatings as support of antibrowning agents applied on fresh-cut Fuji apple. *Food Hydrocolloids*, 21:118–127.
- Ruiz-Hernández, F. (2009) Aplicación de películas comestibles a base de quitosano y mucílago de nopal en fresa (*Fragaria Ananassa*) almacenada en refrigeración. Tesis Maestría en Ciencia de Alimentos. UDLA, México.
- Saenz, C., Sepulveda, E., (1993). Alternativas de industrialización de la tuna (*Opuntia ficus-indica*). *Alimentos*, 18 (3): 29–32.
- Sáenz, H.C. (2006). *Opuntia* spp. Bioactive compounds in foods: a plus for health. Proceedings of fifth International Congress on Cactus Pear and Cochineal. *Acta Horticulturae*, 728: 231-225.
- Sáenz, H.C. (2004). Compuestos funcionales y alimentos derivados de *Opuntia* spp. El nopal, tópicos de actualidad. Universidad Autónoma Chapingo, México. pp.222.
- Sáenz, H.C., Berger, H., Corrales, G.J., Galletti, L., García D.C.V., Higuera, I., Mondragón, C., Rodríguez-Félix, A., Sepúlveda, E y Varnero, M.T. (2006). Utilización agroindustrial del nopal. Servicio de Tecnologías de Ingeniería Agrícola y Alimentaria (AGST) con la colaboración de la Red Internacional de Cooperación Técnica del Nopal (FAO-CACTUSNET). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. pp. 168.

-
- Sáenz, H.C., Sepúlveda, E. y Matsuhira, B. (2004). *Opuntia spp.* mucilage's: A functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environment*, 57: 275–290.
- Sánchez-González, L., Vargas, M., González-Martínez, C., Chiralt, A., Cháfer, M. (2009). Characterization of edible films based on hydroxypropylmethylcellulose and tea tree essential oil. *Food Hydrocolloids*, 23: 2102–2109.
- Saucedo-Pompa, S., Rojas-Molina, R., Aguilera-Carbó, A.F., Saenz-Galindo, A., La Garza, H., Jasso-Cantú, D. y Aguilar, C.N. (2009). Edible film based on candelilla wax to improve the shelf life and quality of avocado. *Food Research International*, 42: 511–515.
- Scheinvar, L. (1999). Taxonomía de las Opuntias utilizadas. En: *Agroecología. Cultivo y usos del nopal*. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal. No 132. Roma, Italia.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E. y Aceituno, C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia spp.* *Journal of Arid Enviroments*, 68: 534-545.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C., y Gómez, C. (2003). Comportamiento reológico de néctar elaborado con hidrocoloide de nopal: efecto del tratamiento térmico. *Memorias IX Congreso Nacional y VII Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*. Zacatecas, México.
- Serrano, M., Martínez-Romero, D., Castillo, S., Guillén, F., Valero, D. (2004). Role of calcium and heat treatments in alleviating physiological changes induced by mechanical damage in plum. *Postharvest Biol. Technol.* 34: 155–167.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SIAP. (2013). Consultado: Marzo-2013. Disponible en: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=351.
- Shellhammer, T. H., Krochta, J.M. (1997). Whey protein emulsion film performance as affected by lipid type and amount. *J. Food Sci.* 62(2): 390-394
- Soazo, M., Rubiolo, A. C. y Verdini, R. A. (2011). Effect of drying temperature and beeswax content on physical properties of whey protein emulsion films. *Food Hydrocolloids*, 25 (5): 1251-1255.

-
- Sothornvit, R. (2011). Edible coating and post-frying centrifuge step effect on quality of vacuum-fried banana chips. *Journal of Food Engineering*, 107 (3-4): 319-325.
- Southern Nevada Water Authority (SNWA). (2013). Consultado: Marzo-2013. Disponible en: http://www.snwa.com/apps/plant/detail.cfm?current_page=3&type=81&id=15000.
- Su Cha, D. y Chinnan, M. S. (2004). Biopolymer-Based Antimicrobial Packaging: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44: 223–237.
- Sudzuki, F. (1999). Anatomía y morfología. Agroecología, cultivo y usos del nopal. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal. Roma-Italia. pp. 132.
- Talens, P., Krochta., J.M. (2005). Plasticizing effects of beeswax and carnauba wax on tensile and water vapor permeability properties of whey protein films. *J. Food Sci.* 70 (3): 239-243.
- Tharanathan, R.N. (2003). Biodegradable films and composite coatings: past, present and future: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 14: 71-78.
- Thompson, A. K. (2003). Postharvest technology of fruits and vegetables. En: Thompson, A. K. *Fruit and Vegetables; Harvesting, Handling and Storage*. Blackwell Publishing Ltd. Oxford, U.K. pp. 311-313.
- Trachtenberg, S.H., Meyer A. (1982). Mucilage cells, calcium oxalate crystals and soluble calcium in *Opuntia ficus indica*. *Annals of Botany*, 50: 549-557.
- Usenik, V., Kastele, D., Veberic, R., y Štampar, F. (2008). Quality changes during ripening of plums (*Prunus domestica* L.). *Food Chemistry*, 111: 830–836.
- Usenik, V., Kastele, D., Veberic, R., y Štampar, F. (2009). Anthocyanins and fruit colour in plums (*Prunus domestica* L.) during ripening. *Food Chemistry*, 114 (2): 529-534.
- Uzun, I. (1996). Fruit and cladodes isosymes in cactus pear. *Acta Hort.* 438: 53-55.
- Valero, D., Díaz-Mula, H. M., Zapata, P. J., Guillén, F., Martínez-Romero, D., Castillo, S., Serrano, M. (2013). Effects of alginate edible coating on preserving fruit quality in four plum cultivars during postharvest storage. *Postharvest Biology and Technology*, 77: 1-6.

-
- Valle-Guadarrama, S., López, R.O., Reyes, V.M., Castillo, M.J. y Santos, M.A. (2008). Recubrimiento comestible basado en goma arábica y carboximetilcelulosa para conservar frutas en atmósfera modificada. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 14(3): 235-241.
- Vargas, M., Albors, A., Chiralt, A. y González-Martínez, C. (2006). Quality of cold-stored strawberries as affected by chitosan-oleic acid edible coatings. *Postharv. Biol. Technol.* 41:164-171.
- Vargas, M., Pastor, C., Chiralt, A., McClements, D. J. y González-Martínez C. (2008). Recent advances in edible coatings for fresh and minimally processed fruits. *Critical reviews in food science and nutrition*, 48: 496-511.
- Velázquez, E. (1998). *El nopal y su historia*. Clío, México.
- Villalobos, R., Chanona, J., Hernández, P., Gutiérrez, G., Chiralt, A. (2005). Gloss and transparency of hydroxypropyl methylcellulose films containing surfactants as affected by their microstructure. *Food Hydrocolloids*, 19 (1): 53-61.
- Wang, X., Sun, X., Liu, H., Li, M. y Ma, Z. (2011). Barrier and mechanical properties of carrot puree films. *Food and Bioproducts Processing*, 89: 149–156.
- Wardowski, W.F., Miller, W. M. y Grierson W. (2006). *Fresh Citrus Fruits*. 2nd Edition. Abi.Wesport, CT. E.U.A. pp. 602.
- Williams, P. A. y Phillips, G. O. (2000). *Handbook of hydrocolloids*. CRC Press, Cambridge, England. pp 1-19.
- Yahia, E. M. (2009). *Modified and controlled atmospheres for the storage, transportation and packaging of horticultural commodities*. CRC Press. Taylor and Francis Group. pp. 608.
- Zaldo, C., Albella, J. M., Cintas, A. M., Miranda, T. y Serratosa, J. M. (1993). Propiedades mecánicas de los sólidos. En: *Introducción a la Ciencia de Materiales. Técnicas de preparación y caracterización*, CSIC, Madrid, España. pp. 233-258.

Zúñiga, R. N., Skurtys, O., Osorio, F., Aguilera, J. M. y Pedreschi, F. (2012). Physical properties of emulsion-based hydroxypropyl methylcellulose films: Effect of their microstructure. *Carbohydrate Polymers*, 90 (2): 1147-1158.

APÉNDICE A

PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas se determinan mediante la información primaria de la gráfica de Fuerza (lb_f) vs tiempo (min) obtenida a partir de la máquina de pruebas mecánicas SINTECH 1/S. Con los datos de la gráfica se obtendrá la Fuerza (N) y se procederá a calcular el esfuerzo nominal mediante la ecuación (1).

$$\sigma = F/A \quad (1)$$

Donde F es la fuerza aplicada a la película y A es el área de la película sobre la que se aplicó la fuerza, corresponde al área transversal (diámetro= 0.013 m, área=1.33 x10⁻⁴ m²) en las pruebas de punción y al producto del espesor de la película x el ancho de los listones (1 cm) en las pruebas de extensión.

Posteriormente con la ecuación (2) se calcula la longitud final y la deformación relativa nominal de la película para un tiempo t de la prueba con las ecuaciones (3) y (4).

$$L = L_0 + v \cdot t \Rightarrow L = L_0 + v \cdot t \quad (2)$$

Donde L es la longitud de la película al tiempo t, v corresponde a la velocidad de 60 mm/min para la fuerza de fractura en la punción y de igual manera para la fuerza de fractura en la extensión y t es el tiempo.

$$L = L - L_0 \quad (3)$$

L₀: Longitud inicial de la película.

$$= L / L_0 \quad (4)$$

La deformación dada por la ecuación (4) es la deformación de Cauchy. El esfuerzo normal verdadero (σ_v) se calculó con la ecuación (6) y la deformación relativa normal de Hencky (ε_H) con la ecuación (8), en la punci3n (Gij3n-Arreortúa, 2011).

$$\sigma_v = \frac{\sigma(L_0 - \Delta L)}{L_0} = \sigma \left[1 - \frac{\Delta L}{L_0} \right] \quad (5)$$

$$\sigma_v = \sigma(1 - \varepsilon) \quad (6)$$

$$\varepsilon_H = -\ln \left[1 - \frac{\Delta L}{L_0} \right] \quad (7)$$

$$\varepsilon_H = -\ln(1 - \varepsilon) \quad (8)$$

APÉNDICE B.

Propiedades físicas, de barrera y mecánicas de diferentes películas comestibles elaboradas con base en mucílago de nopal (M), grenetina (G) sin y con cera de abeja (C).

Formulación	Propiedades físicas					Propiedades de barrera			Propiedades mecánicas	
	Espesor (mm)	Color			Transparencia (%)	PVA (g*mm/m ² *d*kPa)	PO ₂ (cm ³ *µm/m ² *d*kPa)	PCO ₂	EFE	EFP
		Luminosidad	Croma	Tono						
1 (G ₁)	0.102 ±0.021 ^a	82.425 ±0.817 ^g	7.817 ±0.241 ^h	60.775 ±2.966 ^e	1.203 ±0.024 ^h	10.782 0.025 ^d	8163.07 ±1448.82 ^b	6711.92 ±1340.58 ^b	1.80 ±1.018 ^a	0.027 ±0.011 ^{a,b}
2 (G ₂)	0.133 ±0.020 ^{b,c,d}	83.503 ±0.466 ^h	6.528 ±0.373 ^g	64.604 ±2.580 ^e	1.592 ±0.032 ^g	13.765 ±0.153 ^f	7633.30 ±1388.21 ^b	5819.35 ±1440.55 ^b	4.49 ±1.014 ^b	0.056 ±0.009 ^{a,b}
3 (G ₃)	0.150 ±0.028 ^{c,d,e}	83.998 ±0.462 ^h	5.223 ±0.803 ^f	62.114 ±4.75 ^e	1.872 ±0.022 ^{f,g}	15.189 ±0.040 ^g	7489.68 ±1682.14 ^b	5586.19 ±1540.68 ^b	9.97 ±1.016 ^c	0.182 ±0.017 ^e
4 (M ₁ G ₁)	0.131 ±0.022 ^{b,c}	80.707 ±0.338 ^f	4.914 ±0.307 ^{e,f}	46.494 ±4.601 ^d	2.420 ±0.044 ^{e,f}	13.862 ±0.013 ^f	10373.06 ±1152.14 ^c	8511.19 ±1636.62 ^c	1.21 ±0.488 ^a	0.029 ±0.012 ^{a,b}
5 (M ₂ G ₁)	0.122 ±0.022 ^{a,b,c}	79.055 ±0.899 ^{d,e}	2.740 ±0.440 ^b	19.282 ±3.239 ^{a,b,c}	3.299 ±0.164 ^{d,e}	10.799 ±0.185 ^d	11353.39 ±1448.82 ^d	9530.24 ±1228.27 ^d	1.21 ±0.235 ^a	0.051 ±0.008 ^{a,b}
6 (M ₃ G ₁)	0.137 ±0.021 ^{b,c,d,e}	78.305 ±0.549 ^{d,c}	3.755 ±0.653 ^{c,d}	44.395 ±3.226 ^d	4.073 ±0.077 ^{b,c}	12.111 ±0.084 ^e	12317.94 ±1254.83 ^e	10356.54 ±1112.34 ^e	1.35 ±0.269 ^a	0.064 ±0.029 ^{b,c}
7 (M ₁ G ₂)	0.124 ±0.019 ^{a,b,c}	81.623 ±1.288 ^g	3.526 ±0.325 ^{b,c,d}	45.018 ±3.567 ^d	2.537 ±0.041 ^g	12.640 ±0.151 ^e	11381.76 ±1558.21 ^d	9606.51 ±1564.72 ^d	4.62 ±1.019 ^b	0.108 ±0.025 ^{c,d}
8 (M ₂ G ₂)	0.125 ±0.014 ^{a,b,c}	82.467 ±0.917 ^g	1.558 ±0.539 ^a	30.330 ±9.911 ^{b,c,d}	3.456 ±0.025 ^{b,c,d}	12.290 ±0.079 ^e	11525.06 ±1682.14 ^d	9728.27 ±1151.98 ^d	4.77 ±1.037 ^b	0.141 ±0.027 ^{d,e}
9 (M ₃ G ₂)	0.124 ±0.010 ^{a,b,c}	77.012 ±1.011 ^b	3.011 ±0.453 ^b	16.106 ±7.921 ^{a,b}	4.684 ±0.008 ^{b,c}	10.713 ±0.153 ^d	11422.69 ±1548.82 ^d	9642.59 ±1658.31 ^d	5.4 ±1.048 ^b	0.148 ±0.029 ^{d,e}
10 (M ₁ G ₃)	0.120 ±0.013 ^{a,b}	79.357 ±0.331 ^e	4.873 ±0.295 ^{b,e,f}	39.283 ±3.047 ^d	2.625 ±0.041 ^{e,f}	10.948 ±0.369 ^d	10868.75 ±1521.41 ^c	9154.04 ±1690.48 ^c	8.86 ±1.019 ^c	0.250 ±0.038 ^f
11 (M ₂ G ₃)	0.138 ±0.015 ^{b,c,d,e}	77.825 ±0.464 ^{b,c}	2.749 ±0.668 ^b	16.006 ±4.802 ^{a,b}	3.152 ±0.025 ^{c,d}	12.649 ±0.512 ^e	11445.93 ±1548.42 ^d	10112.90 ±1343.56 ^e	8.01 ±1.021 ^{c,d}	0.299 ±0.031 ^g
12 (M ₃ G ₃)	0.159 ±0.024 ^{d,ef}	77.455 ±0.297 ^{b,c}	3.246 ±0.441 ^{b,c,d}	34.093 ±10.785 ^{c,d}	3.668 ±0.009 ^b	14.250 ±0.146 ^f	11991.48 ±1188.21 ^e	9736.07 ±1240.53 ^{d,e}	9.05 ±1.019 ^{c,d}	0.357 ±0.021 ^h
13 (M ₁ G ₁ C ₁)	0.145 ±0.020 ^{b,d,e}	77.490 ±0.612 ^{b,c}	3.249 ±0.842 ^{b,c,d}	38.428 ±6.357 ^d	3.147 ±0.081 ^{b,c,d}	6.547 ±0.024 ^a	6173.10 ±1118.62 ^a	3923.16 ±1357.82 ^a	0.54 ±0.223 ^a	0.012 ±0.005 ^{a,b}
14 (M ₃ G ₁ C ₁)	0.160 ±0.037 ^{c,e,f}	75.438 ±0.747 ^a	3.332 ±0.556 ^{b,c,d}	43.659 ±10.635 ^d	5.442 ±0.102 ^a	9.715 ±0.930 ^c	6488.81 ±1268.12 ^a	4328.20 ±1458.24 ^a	1.43 ±0.221 ^a	0.037 ±0.007 ^{a,b}
15 (M ₁ G ₁ C ₂)	0.177 ±0.033 ^f	77.636 ±0.382 ^{b,c}	4.092 ±0.398 ^{d,e}	34.136 ±10.810 ^{c,d}	4.696 ±0.107 ^a	8.248 ±0.511 ^b	6351.50 ±1528.84 ^a	4188.40 ±1363.54 ^a	0.38 ±0.109 ^a	0.010 ±0.004 ^a

1=0.5%, 2=1%, 3=1.5 % (p/v).

Cada valor representan la media de 6 películas ± SD. Diferentes letras indican diferencia significativa (P 0.05).

PVA, PO₂ y PCO₂: Permeabilidad al vapor de agua, oxígeno y dióxido de carbono, EFE y EFP: Esfuerzo de fractura en la extensión y punción, respectivamente.

Las formulaciones 9 y 13 fueron las seleccionadas para su aplicación como recubrimiento comestibles en ciruelas (*Prunus salicina* L.)

APÉNDICE C

Efectos de la aplicación de recubrimientos comestibles en los parámetros de calidad y fisiológicos en ciruela (*Prunus salicina* L.).

Tratamiento	Parámetros de calidad																	
	Pérdida de peso (%)		Firmeza (MPa)		Sólidos solubles (°Brix)		pH		Acidez (% ácido málico)		Color						Respiración (mg CO ₂ /kg*h)	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	Luminosidad		Croma		Tono		P1	P2
											P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
S/R	6.396	16.284	0.185	0.095	13.70	14.067	3.183	3.483	0.270	0.206	21.587	24.125	29.447	12.511	13.945	10.630	12.641	18.353
	±0.329	±0.360	±0.023	±0.008	±0.164	±0.145	±0.041	±0.075	±0.012	±0.012	±1.429	±1.621	±2.395	±1.134	±1.379	±1.345	±1.475	±1.404
	c	b	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
F-9	5.451	15.285	0.201	0.101	13.667	14.033	3.133	3.283	0.292	0.232	29.739	31.540	32.960	25.765	20.726	19.913	11.732	15.411
	±0.469	±0.480	±0.030	±0.008	±0.149	±0.147	±0.075	±0.075	±0.013	±0.008	±1.614	±2.107	±2.139	±1.859	±1.459	±1.368	±1.214	±1.360
	b	b	a	a	a	a	a	a	a, b	b	b	c	a	b	a	b	a	a
F-13	4.161	13.021	0.206	0.128	13.567	14.017	3.117	3.217	0.307	0.246	27.052	28.212	33.384	24.223	19.969	18.512	10.705	13.601
	±0.431	±0.266	±0.018	±0.015	±0.138	±0.153	±0.055	±0.013	±0.012	±0.012	±1.815	±1.596	±2.186	±1.882	±1.571	±1.580	±1.035	±1.162
	a	a	a	b	a	a	a	a	b	b	a, b	b	a	b	a	a, b	a	a

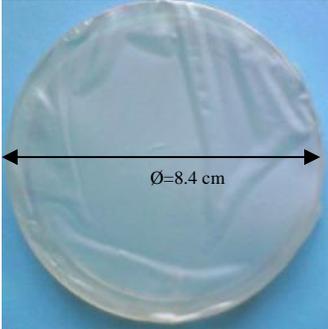
S/R: Sin recubrimiento, F-9: 1.5% de mucílago de nopal, 1% de grenetina, F-13: 0.5% mucílago de nopal, 0.5% grenetina y 0.5% de cera de abeja.

P1 y P2: Primer y segundo periodo de almacenamiento a 1°C por 30 días y 6 días a 25°C, respectivamente.

Cada valor representa la media de 12 frutos ±SD. Diferentes letras indican diferencia significativa (P 0.05).

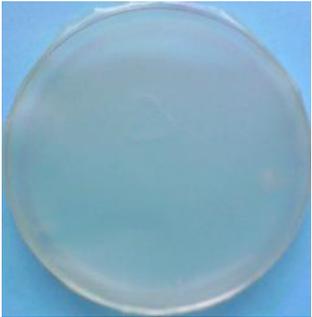
APÉNDICE D

PELÍCULAS DE LAS FORMULACIONES EVALUADAS

Formulación	Imagen	Formulación	Imagen
1 (G ₁)		4 (M ₁ G ₁)	
2 (G ₂)		5 (M ₂ G ₁)	
3 (G ₃)		6 (M ₃ G ₁)	

M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja, 1=0.5%, 2=1% y 3=1.5 %.

El porcentaje de Tween 80, glicerol, ácido oleico y aceite esencial de tomillo se mantuvo constante en todas las combinaciones siendo 0.9, 0.5, 0.5 y 0.2%, respectivamente.

Formulación	Imagen	Formulación	Imagen
7 (M₁G₂)		10 (M₁G₃)	
8 (M₂G₂)		11 (M₂G₃)	
9 (M₃G₂)		12 (M₃G₃)	

M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja, 1=0.5%, 2=1% y 3=1.5 %.

El porcentaje de Tween 80, glicerol, ácido oleico y aceite esencial de tomillo se mantuvo constante en todas las combinaciones siendo 0.9, 0.5, 0.5 y 0.2%, respectivamente.

Formulación**Imagen****13 (M₁G₁C₁)****14 (M₃G₁C₁)****15 (M₁G₁C₂)**

M=mucílago, G=grenetina, C=cera de abeja, 1=0.5%, 2=1% y 3=1.5 %.

El porcentaje de Tween 80, glicerol, ácido oleico y aceite esencial de tomillo se mantuvo constante en todas las combinaciones siendo 0.9, 0.5, 0.5 y 0.2%, respectivamente.