



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**



**“ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DE MUCILAGO DE NOPAL-PECTINA: EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL MUCILAGO DE NOPAL EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS”**

## **TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**QUÍMICO EN ALIMENTOS**

PRESENTA:  
**ELIZABETH OROZCO SILVAS**

DIRECTORA ACADÉMICA:  
**DRA. ANDREA YAZMIN GUADARRAMA LEZAMA**

COASESOR  
**DR. CESAR PÉREZ ALONSO**

NOVIEMBRE, 2017

## RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue desarrollar películas comestibles a base de mucilago de nopal (*Opuntia ficus indica*), variedad milpa alta, con un componente proteico (pectina) y glicerol como plastificante. La extracción del mucilago de nopal se llevó a cabo con una solución de  $\text{CaCl}_2$  al 20%, mientras que la concentración de solidos totales se realizó utilizando un termo baño a 60 °C. La elaboración de películas comestibles se llevó a cabo por el método casting (vaciado en placa), la evaporación de materia acuosa se eliminó a temperatura de 35 °C. La formulación de las películas varió en base a la concentración de solidos totales del mucilago, tanto pectina como glicerol, permanecieron constantes. La caracterización de las películas consistió en evaluar sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y sus características microestructurales para ser utilizadas como material de protección en alimentos. Las películas que presentaron menos estabilidad térmica fueron las elaboradas con pectina-agua-glicerol (P-A-G) y pectina-glicerol (P-G), en comparación con aquellas con contenido de mucilago de nopal (P-M-G). La incorporación de mucilago de nopal en bajas concentraciones mejoró las propiedades mecánicas (elasticidad, elongación, esfuerzo máximo, etc.). En el análisis microestructural se observó que las películas con altas concentraciones de solidos totales de mucilago de nopal (P-M15-G y P-M20-G) presentaron superficies rugosas y en algunos casos fracturadas. La película que presento mayor permeabilidad de vapor de agua fue la elaborada con pectina-agua-glicerol (P-A-G), encontrando además que al incremental la concentración de solidos totales del mucilago el PVA disminuye.

## DEDICATORIAS

## AGRADECIMIENTOS

Resumen  
Índice general  
Introducción

## **CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO**

1. Marco teórico
  - 1.1 Problemática de contaminación ambiental
    - 1.1.1 Plásticos
    - 1.1.2 Biodegradación de plásticos
  - 1.2 Películas
    - 1.2.1 Películas biodegradables
    - 1.2.2 películas a base de biopolímeros y sus propiedades funcionales
      - 1.2.2.1 hidratos de carbono
      - 1.2.2.2 proteínas
      - 1.2.2.3 lípidos
      - 1.2.2.4 polímeros de origen sintético
    - 1.2.3 películas a base de polisacáridos
    - 1.2.4 películas de mezclas de polisacáridos
    - 1.2.5 Pectinas
      - 1.2.5.1 Películas a base de pectina
    - 1.2.6 Mucilago de nopal
      - 1.2.6.1 Producción de nopal en México
      - 1.2.6.2 Obtención de mucilago de nopal
      - 1.2.6.3 Propiedades del mucilago de nopal
  - 1.3 Plastificantes
  - 1.4 Métodos de elaboración de películas
    - 1.4.1 Método vaciado en placa (casting)

## **Capítulo II JUSTIFICACIÓN**

2. Justificación

## **Capítulo III HIPÓTESIS**

3. Hipótesis

## **Capítulo IV OBJETIVOS**

4. Objetivos
  - 4.1 Objetivo general
  - 4.2 Objetivos específicos

## **Capítulo V MATERIALES Y MÉTODOS**

5. Materiales y métodos
  - 5.1 Materiales
    - a) Materias primas
  - 5.2 Métodos
    - 5.2.1 Extracción de mucilago de nopal
    - 5.2.2 Caracterización de materias primas
    - 5.2.3 Concentración de sólidos totales en mucilago de nopal
    - 5.2.4 Elaboración de películas
      - a) Mezcla pectina-glicerol
      - b) Mezcla pectina-agua-glicerol
      - c) Mezcla pectina-mucilago-glicerol, variando la concentración de sólidos totales en el mucilago.

## **5.2.5 Propiedades físicas de las películas**

5.2.5.1 Color

5.2.5.2 Grosor

5.2.5.3 Solubilidad en agua

5.2.5.4 Determinación de permeabilidad al vapor de agua (PVA) en las películas.

## **5.2.6 Propiedades mecánicas**

5.2.6.1 Resistencia a ruptura (Elongación)

## **5.2.7 Estructura de películas**

5.2.7.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés)

## **5.2.8 Propiedades térmicas**

5.2.8.1 Calorimetría

5.2.8.2 Análisis termogravimétrico

## **Capítulo VI RESULTADOS Y DISCUSIONES**

6. Resultados y Discusiones

6.1 Extracción del mucilago de nopal

6.2 Caracterización de las materias primas

6.2.1 Concentración del mucilago

6.3 Elaboración de películas

6.4 Caracterización física de las películas

6.5 Caracterización mecánica de las películas

6.6 Caracterización óptica de las películas

6.7 Caracterización térmica

6.8 Caracterización estructural de las películas

## **CAPÍTULO VII CONCLUSIONES**

7. CONCLUSIONES

## **CAPÍTULO VIII**

8. REFERENCIAS

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Numero de tabla</b>	<b>Nombre de tabla</b>	<b>Página</b>
1	Principales tipos de plásticos generadores de residuos	9
2	Tipos de polímeros y tiempo de degradación	13
3	Formulación de películas	42
4	Parámetros de propiedades mecánicas	53
5	Propiedades térmicas de las películas	56
6	Picos de temperatura máxima de degradación y DSC	58
7	Permeabilidad de vapor de agua	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Número de figura	Nombre de la Figura	Página
1	Residuos urbanos	8
2	Estructura molecular básica de la pectina	24
3	Estructura molecular del glicerol	31
4	Parámetros de color	50
5	Parámetros de solubilidad	52
6	Parámetros de propiedades mecánicas (E, ey, eM, eB)	54
7	Parámetros de propiedades mecánicas (sy, sM, sB)	
8	Análisis TGA-parámetros de pérdida de peso	56
9	Aplicación de figura 7-tercera etapa	57
10	Termogramas de degradación	59
11	Micrografías MEB	60





## INTRODUCCION

La tendencia por la protección del medio ambiente, ha llevado a la búsqueda de nuevas alternativas de empaques para frutas y verduras, disminuyendo el uso de empaques sintéticos no biodegradables. Actualmente se buscan emplear productos que se degraden totalmente en dióxido de carbono, agua y que posteriormente puedan servir como abono orgánico. Las películas elaboradas con materiales biodegradables como almidones, ceras, entre otras, ofrecen transparencia, flexibilidad y dureza, adicionalmente con el empleo de plastificantes comerciales, se logra aumentar sustancialmente la biodegradabilidad y mejoran las propiedades mecánicas y de barrera (Villada et al., 2007).

En la actualidad se encuentran investigaciones en las que se emplean materiales de recubrimiento como almidones, quitosano, pectinas, ceras, gomas, proteínas con el fin de prolongar la vida de productos hortofrutícolas.

El mucilago de nopal es un polímero compuesto por polisacáridos semejante a las pectinas, ésta propiedad así como sus características reológicas le dan un potencial como materia prima para la elaboración de películas plásticas comestibles (Arizmendi, 2004). Del Valle et al. (2005), comprobó la eficiencia de una película comestible de mucilago de nopal como recubrimiento en fresas (*Fragaria ananassa*), observó el incremento de vida útil sin afectar el color y sabor del alimento.

El uso de pectina en la elaboración de películas comestibles ha sido reportado por Galus et al. (2013) y Giancone et al. (2009) quienes desarrollaron y caracterizaron películas elaboradas con este material. La adición de plastificantes a las soluciones filmogénicas empleadas para elaborar películas comestibles logran disminuir las fuerzas de atracción intermoleculares, modificando las propiedades mecánicas y de permeabilidad a gases (Gontard et al., 1993).

# CAPITULO I

## MARCO TEORICO

## **1. Marco teórico**

### **1.1 Problemática de contaminación ambiental**

Se denomina contaminación ambiental a la presencia en el ambiente de cualquier agente (físico, químico o biológico) o bien de una combinación de varios agentes en lugares, formas y concentraciones tales que sean o puedan ser nocivos para la salud, la seguridad o para el bienestar de la población, o bien, que puedan ser perjudiciales para la vida vegetal o animal, o impidan el uso normal de las propiedades y lugares de recreación y goce de los mismos. La contaminación ambiental es también la incorporación a los cuerpos receptores de sustancias sólidas, líquidas o gaseosas, o mezclas de ellas, siempre que alteren desfavorablemente las condiciones naturales del mismo, o que puedan afectar la salud, la higiene o el bienestar del público (González, 2006).

Los causantes o contaminantes pueden ser químicos, físicos y biológicos. Los contaminantes se clasifican de la siguiente manera:

- **Contaminantes no degradables:** Son aquellos contaminantes que no se descomponen por procesos naturales. Por ejemplo, son no degradables el plomo y el mercurio.
- **Contaminantes de degradación lenta o persistente:** Son aquellas sustancias que se introducen en el medio ambiente y que necesitan décadas o incluso a veces más tiempo para degradarse. Ejemplos de contaminantes de degradación lenta o persistente son el DDT y la mayor parte de los plásticos.
- **Contaminantes degradables o no persistentes:** Los contaminantes degradables o no persistentes se descomponen completamente o se reducen a niveles aceptables mediante procesos naturales físicos, químicos y biológicos.

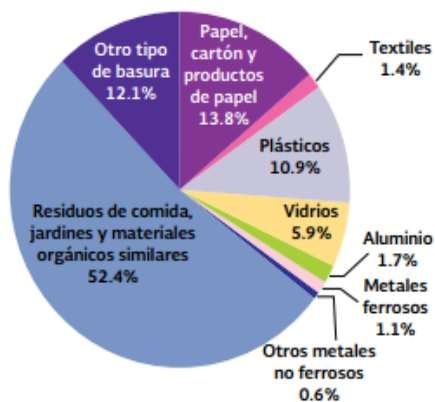
- Contaminantes biodegradables: Los contaminantes químicos complejos que se descomponen en compuestos químicos más sencillos por la acción de organismos vivos se denominan contaminantes biodegradables.

Dentro de todos los contaminantes, existen los residuos sólidos urbanos, son los que se generan en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (p. e., de los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques) o los que provienen también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias, y los resultantes de las vías y lugares públicos siempre que no sean considerados como residuos de otra índole (DOF, 2003). Siendo estos una problemática creciente alarmantemente.

Según la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol) y conforme a lo establecido en la norma NMX-AA-61-1985 sobre la Determinación de la Generación de Residuos Sólidos en 2011 se generaron alrededor de 41 millones de toneladas, lo que equivale a cerca de 112.5 mil toneladas de RSU diariamente. La generación de RSU se ha incrementado notablemente en los últimos años; tan sólo entre 2003 y 2011 creció 25%, como resultado principalmente del crecimiento urbano, el desarrollo industrial, las modificaciones tecnológicas, el

gasto de la población y el cambio en los patrones de consumo.

En México el consumo per cápita varía de región geográfica, siendo la zona centro y zonas metropolitanas las que más generan residuos sólidos llegando a 1.5 kg diarios, mientras que zonas menos pobladas (sur del país) generaron en promedio 0.76 kg por día. En la figura de la derecha se muestra los elementos



Fuente: Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas, Sedesol. México. 2012.

Figura 1. Residuos urbanos

que conforman los RSU, de los cuales nos interesan los plásticos, que como se puede observar tienen el 10% del total de SRU equivalentes a 12.26 mil toneladas de plástico, del cual solo alrededor de 1.2% son reciclados (Sedesol, 2012), siendo el resto un gran problema de contaminación en mares, ríos, entre otros ecosistemas. Siendo su tardía degradación el principal problema, ya que demoran de 100 a 1000 años en degradarse totalmente, sabiendo que no podemos eliminar el plástico de nuestra vida cotidiana es necesario buscar alternativas ecológicas para lograr elaborar e utilizar plásticos biodegradables que sean más nobles con la tierra.

### 1.1.1 PLÁSTICOS

Los plásticos son toda una familia de materiales con diversos usos. Sus propiedades les permiten ser moldeados en infinidad de formas, generando miles de productos. El plástico ha reemplazado otros materiales, por su bajo costo, su poco peso, permeabilidad, durabilidad e higiene. El plástico es un material inorgánico que tiene alta durabilidad. Se calcula que puede tardar entre 100 y 1000 años para degradarse dependiendo del tipo de plástico (González et al., 2003).

**Tabla 1. Principales tipos de plásticos generadores de residuos**

Código SPI	Tipo de plástico	Productos	Productos elaborados con material recuperado
1 PET	Polietileno Tereftalato	Botellas de bebidas	Tejas Escobas Fibras para la fabricación de hilos
2 PEAD	Polietileno de alta densidad	Envases Canastas de bebidas y alimentos. Bolsas resistentes Balde Plato de comida de mascotas	Canastas de bebidas Materas Envases Mangueras
3 PVC	Policloruro de Vinilo	Tubos de PVC Tarjetas débito y crédito Envases de aceite	Llaveros Señalización de vías Mangueras
4 PEBD	Polietileno de baja densidad	Empaques (de la harina, leche) Invernaderos Embalaje	Bolsas para la basura Mangueras
5 PP	Polipropileno	Paquetes de pasabocas, esferos, cepillos, pitillos, canastillas de plástico, muebles plásticos	Hebillas para el pelo, ganchos para colgar ropa
6 PS	Poliestireno	Empaque de Alpineto, Alpinette, cubiertos desechables	Tejas Cintas de empaqueo Balacas, Pulseras
6 PS	Poliestireno expandido	Empaques de icopor	
7 Otros	Otros	Botellón de agua, biberones, cds, carcasas para electrodomésticos	Hebillas de pelo

Fuente: Acoplásticos (1999)

La contaminación está en el aire, en la tierra, en el agua, la contaminación ya es parte de nosotros y ante una sociedad cambiante donde la vida es cada vez más acelerada, donde la tecnología nos ha ido cambiando para ser seres más superficiales, donde todo se hace para durar poco, donde las cosas son desechables, donde el consumismo se ha hecho cada vez más presente.

El plástico se ajustó perfectamente a esta transformación cultural hacia el desecho. Gracias a su bajo costo ha sido posible el éxito de productos diseñados para desechar. Cada vez son más los productos hechos con plástico. Estos productos han cambiado hábitos, siendo posible botar los platos en vez de lavarlos y deshacerse de labores desagradables, como la de lavar un pañal. El plástico ha brindado la posibilidad de hacer menos esfuerzo, facilitando algunas actividades de la vida diaria. Además, ha tenido un papel primordial en la prevención de transmisión de enfermedades y en la obtención de una mejor higiene (Maldonado, 2012)

Los plásticos nos han hecho la vida más fácil en todos los ámbitos, en todas las áreas, en electrodomésticos, muebles, en la industria automotriz, en ropa y calzado, en aparatos tecnológicos, material médico, medicamentos y sin duda alguna en alimentos tanto en la maquinaria para su elaboración como en sus envases, primario, secundario e incluso en el embalaje.

Es claro que el plástico contribuye a mejorar la comodidad y bienestar de la sociedad actual, sin embargo la cantidad de residuos generados plantea un reto ambiental, ya que por su composición no todos los plásticos pueden ser reciclados, ni todos contaminan de la misma manera. Por ejemplo, el principal impacto del PET es la cantidad de residuos generada, debido a su uso en productos de vida útil corta; por el contrario, el PVC tiene una vida útil larga cuando es usado en construcciones, pero contiene tóxicos para el ambiente y la salud humana. El reciclaje no debe ser la única solución, pues no todos los plásticos pueden ser reciclados, es por ello que se debe

optar por una nueva tendencia hacia productos biodegradables, que además de contribuir satisfactoriamente en nuestras necesidades, sean nobles con la naturaleza, degradándose en menos tiempo.

### 1.1.2 Biodegradación de los plásticos

Los plásticos son cuestionados por su relativo extenso tiempo de degradación y una alta tasa de producción de residuos. A nivel mundial, la industria ha desarrollado diferentes tecnologías y alternativas para que el plástico acelere su proceso de degradación y se biodegraden. La biodegradación consiste en degradar un material con hongos, bacterias y otros microorganismos, para obtener dióxido de carbono, metano, compuestos inorgánicos, agua y biomasa. Los polímeros se convierten en biodegradables en ambientes aerobios como el compostaje o en el agua; o en ambientes anaerobios, como en los rellenos sanitarios. En condiciones aerobias, el carbono es oxidado biológicamente a dióxido de carbono dentro de la célula liberando energía que es aprovechada por los microorganismos. Bajo condiciones anaerobias se produce CO<sub>2</sub> más metano. La biodegradación que se da en los rellenos genera emisiones de metano que contribuyen al cambio climático (BPI, 2010; Platt, s.f).

Uno de los productos biodegradables más conocidos, son los oxo-biodegradables. La biodegradación de estos consiste en la introducción de metales (cobalto, manganeso, magnesio, hierro, zinc, entre otros) que en teoría fomenta la oxidación y rompe la cadena del plástico cuando se expone al calor, aire o luz. Al romper la cadena los microorganismos encontrados en los sitios de disposición final se alimentarían del material. Para los rellenos no se ha presentado datos que soporten una completa biodegradación en los ambientes anaeróbicos. En condiciones climáticas áridas con exposición al calor y luz solar, los aditivos oxo-biodegradables aceleran la fragmentación tradicional de los polímeros. Sin embargo, la fragmentación no es señal de biodegradación y no hay datos que muestren



por cuánto tiempo los fragmentos se mantienen en los suelos o en el agua (BPI, 2010).

### 1.1.3 Polímeros sintéticos no biodegradables

Los polímeros son grandes moléculas llamadas macromoléculas, que por lo general son orgánicas y están formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros, formando enormes cadenas de las formas más diversas, el que sean sintéticos se refiere a que no existen naturalmente si no que están hechos por el hombre.

Estos están hechos principalmente a base de petróleo y tardan muchísimos años en poder degradarse por completo, ya que las bacterias y microorganismos encargadas de su destrucción, junto con la erosión terrestre, no pueden descomponerlos, y al estar tanto tiempo sin degradarse no solamente ensucian el planeta, sino que en muchos casos también producen varios tipos de contaminación, principalmente contaminación de la tierra, el agua y contaminación del aire al ser incinerados (Maldonado,2012).

En el mercado existen diversos polímeros usados en diferentes actividades y productos, tanto en alimentos como en otras áreas.

El polietileno es el polímero de mayor importancia comercial ya que es muy barato, accesible, tiene baja polaridad, aceptables propiedades mecánicas, baja absorción de humedad, entre otras propiedades que lo hacen un material ideal para su aplicación en muchas áreas.

Existen tres tipos de polietileno: alta densidad, baja densidad y lineal baja densidad. Los dos primeros son homopolímeros y el último es un copolímero de etileno con otros monómeros (Arevalo, 1996). Su uso en la industria alimentaria es muy variada, se aplica en bolsas plásticas, empaques de productos cárnicos, quesos, botellas, tapas, etc.

El tiempo de descomposición de ciertos desechos varía en base al tipo de material con el que están elaborados, por lo general los plásticos van de 500 a 1000 años.

**Tabla 2. Tipos de polímeros y su tiempo de degradación**

Desecho	polímero	Tiempo de degradación
Botellas de plástico	tereftalato de polietileno (pet)	1000 años
Tapas de plástico	Poliropileno (pp)	100-1000 años
Bolsas de plástico	poliestireno	150 años
bolígrafo	Polipropileno (pp)	500-1000 años
Vasos, platos desechables	Icopor o poliestireno expandido	1000 años
Lata de gaseosa	aluminio	10 años
Caja de pizza	cartón	5años

Así con estos hay muchos otros ejemplos que son parte de los desechos plásticos que se genera diariamente, algunos tan innecesarios como los popotes, utensilios desechables (vasos, platos, cubiertos), que se utilizan solo una vez y muy seguido, produciendo una gran cantidad de basura, hasta otros muy útiles como las partes de una computadora u de un electrodoméstico, que tienen un tiempo de uso más prolongado.

## 1.2 Películas o recubrimientos

Una película puede ser definida como una capa continua, simple y delgada de un material orgánico que a menudo se coloca en las superficies de los alimentos con la finalidad de preservar sus características fisicoquímicas (Hernández, 2016).

Los términos Recubrimientos Comestibles (RC) y Películas (PC) se utilizan indistintamente para referirse a la aplicación de matrices transparentes y comestibles sobre las superficies de los alimentos, con el fin de servir de empaque y de preservar su calidad. Sin embargo ambos se distinguen por el modo en que son obtenidos y aplicados sobre el producto. Un RC es una matriz fina y continua que se dispone sobre la superficie del alimento mediante la inmersión o aplicación de un spray de la solución filmogénica formulada. Por otra parte las PC son matrices preformadas, obtenidas por moldeo, cuyo espesor es siempre mayor al de los RC. Estas son aplicadas sobre la superficie o como separador de los distintos componentes de un alimento, luego de ser producidas.

Las películas pueden actuar positivamente sobre la calidad y el tiempo de vida del alimento mediante la formación de barreras al oxígeno, aromas o humedad, incorporando aditivos como antioxidantes, agentes antimicrobianos o mejorando la apariencia, estructura o facilidad para la manipulación vinculada a la logística de distribución comercial. El desarrollo de aplicaciones y estudios documentados de los últimos 20 años, permiten contar con una extensa variedad de películas con buenas propiedades mecánicas y de barrera (Daraba, 2008)

Las cubiertas comestibles participan en la generación de un microclima que favorece la prolongación de la vida útil del alimento, debido a la modificación de la atmósfera por el control del intercambio gaseoso a través de la membrana, que retrasa la respiración y las reacciones oxidativas. Además, las cubiertas comestibles brindan al sistema alimenticio la posibilidad de incorporar ingredientes activos como colorantes, antioxidantes, conservantes, agentes de

control del oscurecimiento químico o enzimático, condimentos y muchas otras opciones tecnológicas (Rojas et al. 2009).

### **1.2.1 Películas biodegradables**

La primera generación de materiales biodegradables consistió en mezclas de polímeros con fuentes naturales de alimentación como el almidón. El segundo intento se concentró en la inserción de grupos funcionales tales como enlaces éster sobre la estructura base polimérica, siendo estos grupos susceptibles al ataque microbiano. El tercer avance es el desarrollo de materiales como el polihidroxibutirato (PHB) que son naturalmente sintetizados por bacterias creciendo dentro de fermentadores. Estos últimos pueden ser considerados como verdaderamente biodegradables. Las aplicaciones de estos materiales es muy grande, desde aplicaciones médicas como implantes de cirugía y de soportes para drogas de liberación prolongada, hasta aplicaciones agrícolas tales como acolchado, y muchas aplicaciones tradicionales de empaque (Arevalo, 1996).

Un empaque biodegradable está definido por la ASTM con la que es capaz de descomponerse en bióxido de carbono, metano, agua, compuestos inorgánicos o biomasa, siendo el mecanismo dominante de descomposición la acción enzimática de los microorganismos y que los productos resultantes puedan ser obtenidos y medidos en un periodo determinado de tiempo (ASTM, 2005).

La degradación de dichos empaques puede ser por dos vías, aerobia o anaerobia, la diferencia entre ambas es que la biodegradación aerobia se lleva a cabo en presencia de oxígeno y se obtiene biomasa, dióxido de carbono, agua y compuestos inorgánicos, mientras que la degradación anaerobia se realiza en ausencia de oxígeno y en los productos se obtiene metano y metabolitos intermedios en lugar de dióxido de carbono y agua. El grado de biodegradación del empaque también dependerá de las condiciones ambientales tales como temperatura, humedad, presión parcial de oxígeno, composición de la flora microbiana y pH del suelo (Kryricou et al., 2007)

Recientemente se ha hecho hincapié en la investigación de productos biodegradables ante la problemática de la contaminación que generan los polímeros sintéticos. Los materiales más utilizados para la elaboración de empaques biodegradables pueden ser polímeros de origen natural (proteínas, almidón, lípidos, quitosano, entre otros) o de origen sintético (polihidroxialcanoatos y ácido poliláctico) (tharanathan, 2003)

### **1.2.2 Películas a base de biopolímeros**

Existen diferentes biopolímeros con los cuales ofrecen características adecuadas para la elaboración de películas biodegradables. Si bien una película no puede sustituir completamente los materiales de empacamiento tradicionales, ofrecen muchos beneficios, tanto en su uso individual como en mezclas con plásticos o materiales comúnmente usados en envases y embalajes de la industria alimentaria.

Las películas pueden:

- Soportar aditivos alimentarios: pueden ser usados para incorporar agentes antimicrobianos, antioxidantes y otros, en localizaciones específicas del alimento.
- Retardar la migración de humedad: la velocidad de transferencia de humedad entre un alimento y la atmosfera que lo rodea puede ser reducida si el producto entero es recubierto por una película.
- Retardar la migración de aceites y grasas: películas basadas en polímeros hidrofóbicos, son altamente impermeables a grasas y aceites, atributo deseables cuando el alimento está destinado a ser freído en aceite. Algunas películas tienen la capacidad de retardar la absorción de aceite hacia el interior del alimento y, por lo tanto, mejoraría su calidad nutricional.
- Retener compuestos volátiles del flavor: películas basadas en hidrocoloides pueden desarrollar este efecto.
- Retardar el transporte de gases (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>): Como modo primario de deterioro de muchos alimentos involucra la oxidación de lípidos,

vitaminas, componentes del flavor o pigmentos. Las películas también disminuyen la velocidad de la respiración aeróbica de frutas frescas y vegetales.

- Retardar el transporte de solutos: las coberturas comestibles pueden mantener una alta concentración de distintos compuestos sobre la superficie de un alimento colaborado a su concentración en la interface de interés. Esto puede utilizarse para minimizar la difusión de solutos hacia el interior del alimento, en la deshidratación osmótica.
- Mejorar las propiedades mecánicas frente al manipuleo e impartir integridad estructural adicional a los alimentos: el refuerzo de la estructura por una película comestible podría mejorar la integridad durante el procesamiento, almacenamiento y/o distribución.

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

### **1.2.2.1 Hidratos de carbono**

**Almidón:** Este polisacárido ha sido considerado durante muchos años como un polímero con alto potencial para formar películas biodegradables, debido a que es un material de alta disponibilidad, bajo costo, renovable y biodegradable (Stagner et al.,2012). Se usa en la fabricación de empaques en distintos niveles, ya que puede combinarse con plásticos en pequeñas cantidades. Ya se han desarrollado “almidones plastificados”, “almidones termoplásticos” y “espuma de almidón” que varían en su composición de almidón, que va desde un 40 hasta un 100% de este hidrato de carbono. Son completamente biodegradables, compostables y pueden reemplazar a los plásticos de empaques para alimentos.

**Quitosano:** Este material se obtiene mediante un proceso de desacetilación química o enzimática de la quitina. Su producción industrial se basa principalmente en el tratamiento de los caparazones de crustáceos como camarones, langostas y cangrejos, los cuales se obtienen como desecho de las plantas procesadoras de estas especies (Avérous et al., 2012). Se ha demostrado que bajo condiciones aeróbicas en ambientes acuosos, la quitina se degrada a CO<sub>2</sub> en unos cuantos días (el 30% se degrada después de un día) (Boyer, 1994). El quitosano es un material con alto potencial para la elaboración de películas y materiales de empaque, ya que además de ser biodegradable, no es tóxico y tiene propiedades antimicrobianas que le permiten inhibir una amplia variedad de bacterias (Aider, 2010).

#### **1.2.2.2 Proteínas**

En su estado nativo, las proteínas pueden presentar dos tipos de arreglos estructurales: la fibrilar y el globular. Las proteínas fibrilares se caracterizan por ser insolubles en agua y son los constituyentes estructurales de los tejidos animales; están unidas a través de enlaces de hidrógeno, formando fibras. Por su parte, las proteínas globulares son solubles en agua y forman arreglos esféricos complejos; entre ellas se encuentran el gluten de trigo, la proteína de soya, la proteína del suero de leche y la caseína (Flieger et al., 2003).

Caseína: presenta características físicas interesantes para la elaboración de películas y recubrimientos comestibles, tales como solubilidad en agua y capacidad para actuar como emulgentes. Las películas de caseinato presentan alta resistencia a la desnaturalización química y a la coagulación, lo que significa que se mantienen estables en un amplio intervalo de valores de pH, temperatura y concentración de sal. Además, son menos permeables al oxígeno que las películas elaboradas a partir de polisacáridos. Sin embargo, debido a su carácter hidrófilo presentan una resistencia limitada a la transmisión de agua (Khwaldia, 2010).

Gluten de trigo: es un proteína muy interesante en la elaboración de películas debido a que presenta buenas propiedades de barrera a los gases y una naturaleza relativamente hidrófoba en comparación con otros polímeros naturales (Pallos et al., 2006).

Proteína de soya: Existen dos formas para elaborar películas biodegradables basadas en proteína de soya: a partir de leche de soya caliente o de soluciones de aislado de proteína de soya (Gennadios et al., 1992)

### 1.2.2.3 Lípidos

Los compuestos de naturaleza lipídica usados como recubrimientos son: monoglicéridos acetilados, ceras naturales y surfactantes. Las sustancias lipídicas más efectivas son las ceras de parafina y la cera producida por las abejas. La principal función de las cubiertas lipídicas es obstruir el transporte de humedad, debido a su baja polaridad. Por el contrario, la hidrofobicidad característica de los lípidos da lugar a la formación de películas gruesas y frágiles.

Ceras: Son los compuestos comestibles más eficientes para ser usados como barrera a la humedad. Además, sirven como barrera para los gases y mejoran la apariencia superficial de varios alimentos. Si se aplican como una capa gruesa, como en los quesos, deben ser removidas antes de su consumo; cuando se aplican como capas delgadas, como en las frutas y vegetales crudos, son consideradas comestibles. Entre las ceras utilizadas en alimentos están: la de abeja, la de carnauba (un exudado de las hojas de palma, *Copaernica cerifera*) y la de candelilla (Bourtoom, 2008)

Acetoglicérido: La acetilación del glicerol monoesterato mediante su reacción con anhídrido acético, produce 1-estearodiacetina. Este monoglicérido acetilado presenta la característica particular de solidificarse del estado fundido a un sólido ceroso flexible (Feurge et.



al., 1953). Muchos lípidos en el estado sólido pueden estirarse 102% de su longitud original antes de fracturarse. Sin embargo, el glicerol monoesterato acetilado, puede estirarse hasta el 800% de su longitud original.

#### **1.2.2.4 Polímeros de origen sintético**

Los polímeros de origen sintético biodegradables, son resultado de la fermentación de polímeros primarios (celulosa, almidón, proteína, pectina, entre otros), utilizados como sustratos por diferentes microorganismos, obteniendo diferentes productos finales tales como el ácido poliláctico (PLA), polihidroxicanoatos (PHA), entre otros (Robertson, 2010).

Ácido poliláctico (PLA): Es un polímero biodegradable derivado de ácido láctico; es un material altamente versátil que se caracteriza por ser termoplástico, biodegradable y composteable; se produce a partir de recursos renovables y presenta propiedades mecánicas, térmicas y de barrera comparables a las de polímeros sintéticos de amplio uso como el poliestireno y el polietileno tereftalato.

Polihidroxi alconato (PHA): Polímero de origen microbiano producido por *Pseudomonas aeruginosa*. Sintetizados en los cuerpos de las bacterias alimentadas con glucosa. Son polímeros extremadamente versátiles, completamente biodegradables, cristalinos, pueden ser manipuladas para proporcionar una amplia gama de propiedades mecánicas y de barrera, en algunos casos, que coinciden con el rendimiento de termoplásticos de ingeniería. Pueden ser degradados con una hidrólisis simple, sin requerir enzimas que la catalicen (Flieger et al., 2003; Tohyama et al., 2002).

### 1.2.3 Películas a base de polisacáridos

Los polisacáridos son utilizados en la industria de alimentos como gelificantes, espesantes estabilizantes, y formadores de películas comestibles. Se obtienen principalmente de vegetales, algas y microorganismos. Entre los polisacáridos obtenidos de vegetales están la celulosa y el almidón; los polisacáridos obtenidos de algas que más e utilizan son alginatos, las carrageninas y el agar; mientras que los polisacardos obtenidos de microorganismos incluyen la goma xantana, el dextrano y la goma gelan, entre otros (Khan et al., 2007).

Al usar polisacáridos como compuestos para la formulación de películas comestibles, se obtienen películas transparentes que presentas propiedades mecánicas moderadas. Sin embargo, las aplicaciones se limitan debido a que las películas son solubles en agua y permeables al vapor de agua. Para mejorar dichas condiciones es posible adicionar compuestos hidrófobos como ceras o aceites, y también se pueden realizar tratamientos para el entrecruzamiento de las moléculas (Vargas et al., 2011)

Las películas comestibles más comunes donde se utilizan polisacáridos son:

- Películas de carboximetilcelulosa: debido a su bajo costo y a que son materiales biodegradables, los derivados de celulosa son utilizados en la industria de alimentos (Espinoza et al., 2011). Las películas con CMC son resistentes, transparentes y pueden ser flexibles con la adición de plastificantes como el glicerol y tienen alta permeabilidad al vapor.
- Películas de carragenina: las carrageninas son polímeros obtenidos de varias algas marinas; son solubles en agua y tienen una cadena lineal de galactanos parcialmente sulfatados. Las películas producida con carragenina iota y glicerol muestran ventajas interesantes, tales como reducción de transferencia de oxígeno y buenas propiedades

mecánicas. Las películas formadas con la combinación de carragenina y lípidos son una opción interesante para la encapsulación de sustancias activas, como agentes antimicrobianos (Hambleton et al., 2008; Campos et al., 2011).

- Películas de almidón: las fuentes de almidón son muchas y tienen la gran ventaja de estar presentes de forma natural, lo que lo hace un polisacárido excelente como ingrediente a considerar en procesos industriales. Las películas formuladas con almidón presentan propiedades mecánicas limitadas, ya que son quebradizas; aun así son consideradas las películas elaboradas con polisacáridos con mejores características de flexibilidad (Wang et al., 2007).
- Películas de alginato de sodio: debido a sus propiedades coloidales y a su capacidad de formación de geles al reaccionar con cationes de metales, el alginato de sodio es utilizado para la formación de películas comestibles (Tapia et al., 2007). La formación de películas con alginato se basa en la capacidad que tienen el compuesto para reaccionar con cationes divalentes y trivalentes como el calcio, hierro y magnesio, entre otros (Vargas et al., 2008). Estas películas tienen menor resistencia al agua que otras películas formadas con otros polisacáridos (Fazilah et al., 2011). En cuanto a propiedades mecánicas presentan menor flexibilidad (Wang et al., 2007).
- Películas de gomas: la goma de algarrobo ha sido ampliamente estudiada para la formación de películas comestibles. En dichos estados, se determinó que las películas obtenidas con dicha goma y plastificante presentaron valores de permeabilidad al vapor de agua bajos en comparación con otros polisacáridos (Bozdmeir et al., 2003).

#### **1.2.4 Películas de mezclas de polisacáridos**

Las películas con un solo tipo de polisacáridos son buenas y tienen propias cualidades que son deseables para determinadas aplicaciones, pero también

se pueden presentar algunas desventajas en otros aspectos, por tal motivo, se han elaborado películas con mezclas de polímeros, buscando mejorar sus propiedades generales, sabiendo que cada polímero proporcionara diferentes características a la película.

Existen estudios con los compuestos almidón-carboximetilcelulosa usando distintas concentraciones de carboximetilcelulosa y 30% de glicerol como plastificante. Tongdeesoontorn et al. (2011) observaron que la fuerza textil aumento hasta 500%, mientras que la elongación es menor y también se redujo elongación y la solubilidad en agua.

Otra combinación que ha sido estudiada es almidón 3% con goma xantana y glicerol al 20%. La adición de goma xantana produjo un efecto positivo en las propiedades mecánicas, presentando mayor resistencia la ruptura y más estabilidad que las películas formadas únicamente con almidón.

Así como estas se han dado otras combinaciones de polisacáridos que pueden potencializar unas características o disminuir otras, todo depende de cuál será su aplicación y que es lo que mejor favorece nuestro producto.

### **1.2.5 Pectinas**

La pectina es un heteropolímero lineal cuyo componente principal de su estructura es el ácido D-galacturónico, este ácido se encuentra unido por enlaces  $\alpha(1-4)$  glucosídico con algunos grupos carboxilo modificados con metanol (cerca del 75%) presenta cantidades variables de L-ramnosa, D-galactosa, L-arabinosa, y ocasionalmente trazas de otras unidades de azúcar (Thakur et al, 1997). El peso molecular de pectina comercial se encuentra en el orden de 100,000 daltons.

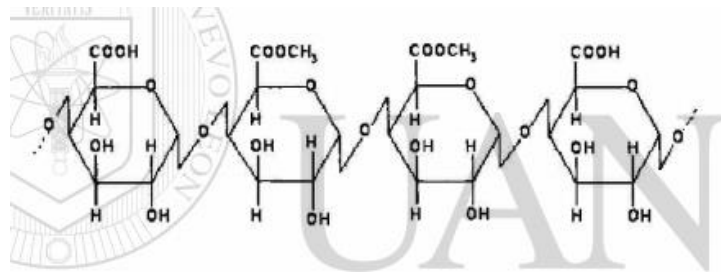
La pectina es un polisacárido que se encuentra presente en la pared celular de los tejidos de las plantas. Comercialmente es obtenida a partir de cascara de cítricos (limos, toronja, naranja, lima) provenientes de la industria jugera. La cascara fresca contiene del 2 al 4% de pectina, mientras que seca se llega a obtener del 20-40%.

De acuerdo con su clasificación las pectinas son sustancias que forman parte original de las plantas, contiene ácidos oectínicos, es soluble en agua y puede formar geles bajo condiciones especiales.

La pectina es subdividida de acuerdo al grado de esterificación, (DE) que es el porcentaje de grupos carboxilos que han sido esterificados con metanol (Chatjigakis, et al. 1998).

El mecanismo de gelificación de las pectinas está regido principalmente por su grado de esterificación.

Las pectinas con un grado de esterificación o metilación mayor de 500 son llamadas pectinas altamente esterificadas o pectinas AM. Cuando el grado de esterificación es menor de 50, son llamadas pectinas bajas en esterificación o Pectinas BM.



**Figura 2. Estructura molecular básica de la pectina**

El principal uso dado a la pectina es en la industria de los alimentos, para la elaboración de jaleas, mermeladas, jaleas instantáneas para pastelería, bebidas, cerezas artificiales, estabilizador de algunos productos lácteos y postres congelados. Recientemente se han utilizado en la elaboración de películas plásticas ya que esta les confiere mejores características físicas.

#### **1.2.5.1 Películas a base de pectinas**

Fabricación de películas biodegradables en forma de mezclas de pectina y alcohol polivinílico como reemplazantes de derivados del petróleo; estas películas son biodegradables, reciclables y permitidas para uso farmacéutico y la industria alimentaria.

Las pectinas con pH por encima de los 3.5 tienen una carga neta negativa, lo que le da facilidad de unirse con regiones positivas de otras moléculas y tener interacciones fácilmente con otros compuestos.

### **1.2.6 Nopal (*Opuntia* spp.)**

El nopal, es una cactácea que se encuentra presente en zonas áridas y semiáridas, con gran diversidad de especies y amplia distribución geográfica en México. Por su composición nutrimental, se considera un buen producto alimenticio, así como una buena opción de forraje en zonas desérticas. Se han descrito también muchas propiedades funcionales, incluyendo el contenido de fibra dietética y de pectina, que sugiere su uso como alimento funcional. Además, se han descrito propiedades medicinales, en el control de la diabetes, como antioxidante, antiviral, anticancerígeno y como anticolesterolémico, por lo que es utilizado en la medicina tradicional.

El nopal se ha visto ligado a la historia de México desde sus orígenes, puesto que una gran proporción de las especies de esta planta, encuentran su origen geográfico en el país. Desde la época prehispánica, las culturas que coexistían en el territorio Mexicano utilizaban el nopal como alimento, como medicamento, en la construcción y en las artes. Su uso se continuó en la época colonial, con las aplicaciones que desde la época precolombina se tenían en uso (Mills, 1824; Anaya-Pérez, 2001).

#### **1.2.6.1 Producción de nopal en México**

El nopal es una cactácea con una gran importancia agronómica a nivel nacional, ya que en México existen 3 millones de hectáreas de nopal nativo y alrededor de 233 000 hectáreas de nopal cultivado; de las cuales 150 000 ha son destinadas al consumo humano (como frutos) con una producción de 139 193 t anuales (Aguirre-Cárdenas et al., 2011)

En México, en el 2007, la superficie sembrada con nopal fue 11 583.56 ha con riego o como temporal; el Distrito Federal tuvo 4337 ha (38 % del total) y el estado de Morelos 2530 ha (22 %), lo cual fue 60 % del cultivo de nopal (SIAP, 2009). La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), y la Delegación Milpa Alta en el Distrito Federal calcularon para 2007 un costo de producción por hectárea de \$9055.00, el cual se compone de asistencia técnica (55 %), cajas de plástico para el empaque (19 %), labores de cultivo y costos de los insumos (26 %) (SAGARPA, 2009).

En México, la mayor parte de la producción de nopal se comercializa en fresco en el mercado nacional, por lo que es necesario alargar su vida de anaquel. El nopal al que se remueve las espinas es comercializado en centros comerciales, mercados y en menor cantidad, en tianguis; en la época de mayor producción, la oferta supera a la demanda (SIAP, 2009).

Hay dos épocas en la producción de nopal: la mayor parte se obtiene de febrero a agosto, donde existe menor precio debido a una producción abundante; de septiembre a enero, como consecuencia del cambio de clima, la producción disminuye y el precio sube (CoMeNTuna, 2009).

#### **1.2.6.1.1 Valor nutritivo del nopal**

El nopal por su parte, al igual que otras verduras, contribuyen con una alta proporción de agua a la dieta y son altamente cotizados por su contenido en fibra; forman parte de la dieta común del pueblo mexicano y están siendo ampliamente consumidos en el sur de Estados Unidos de América por la población mexicana allí residente. Esta verdura, es rica en fibra dietética y su contenido es comparable al de varias frutas y hortalizas, entre ellas la espinaca, la alcachofa, la acelga, la berenjena, el brócoli, el rábano y otras. Entre las frutas, es similar al mango, al melón, al damasco y a la uva (Zambrano et al. 1998; Ruales et al, 1998; Schmidt-Hebbel et al. 1990; Muñoz et al., (1995) señalan que al igual que otras hortalizas, los nopales tienen un

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

#### **1.2.6.1.2 El nopal como alimento funcional**

Los compuestos funcionales son aquellos que tienen efectos beneficiosos para la salud, el nopal es una fuente interesante de tales componentes, entre los que destacan la fibra, los hidrocoloides (mucílagos), los pigmentos (betalaínas y carotenoides), los minerales (calcio, potasio), y algunas vitaminas como la vitamina C, buscada entre otros motivos, por sus propiedades antioxidantes; todos estos compuestos son muy apreciados desde el punto de vista de una dieta saludable y también como ingredientes para el diseño de nuevos alimentos (Sáenz, 2004).

#### **1.2.6.1.3 Usos del nopal en las Agroindustrias**



Sin duda, la posibilidad de utilización integral del nopal es de especial atractivo e interés para el sector agroindustrial, ya que toda industria busca obtener el máximo provecho de sus materias primas. Es una forma específica de aumentar la rentabilidad de la empresa y además se evita la eliminación de desechos. Estos, al ser producidos, pasan no solo a formar parte de las pérdidas de los procesos, influyendo directamente en la rentabilidad de los mismos, sino que además, si no son tratados oportuna y adecuadamente, pueden contaminar el entorno como residuos líquidos o sólidos, provocando en ocasiones daños ambientales irreversibles.

El nopal se ha explotado bastante, que se utiliza desde el nopalito hasta las cascarras de los frutos, teniendo usos y aplicaciones en diferentes áreas de la industria.

- Agroindustria de alimentos y bebidas para consumo humano (producción de diversos alimentos, bebidas alcohólicas y analcohólicas de tuna y nopalitos).
- Agroindustria de alimentos para animales (suplementos y piensos de cladodios y de desechos de la industria procesadora de tuna, como las cáscaras y semillas).
- Industria farmacéutica (protectores gástricos de extractos de mucílagos; cápsulas y tabletas de polvo de nopal).
- industria cosmética (cremas, champúes, lociones de cladodios);  $\frac{3}{4}$  industria de suplementos alimenticios (fibra y harinas de cladodios)
- industria productora de aditivos naturales (gomas de cladodios; colorantes de la fruta).
- sector de la construcción (compuestos ligantes de los cladodios).
- sector energético (producción de biogás a partir de las pencas)
- sector productor de insumos para la agricultura (productos del nopal como mejoradores del drenaje de suelos).
- sector turismo (artesanías en base a cladodios lignificados).
- industria textil (uso de colorantes naturales como el carmín de cochinilla).

En la industria alimentaria el nopal se utiliza para la elaboración de confitados, salmueras y escabeches, jugos, mermeladas y harinas, mientras que el mucilago de nopal es un producto indeseables en todas estos productos (Sáenz, 2006)

#### **1.2.6.2 Mucilago de nopal**

El mucílago del nopal es un polisacárido fibroso, altamente ramificado, cuyo peso molecular oscila alrededor de  $13 \times 10^6$  g/mol. Contiene aproximadamente de 35 a 40 % de arabinosa, 20 a 25% de galactosa y xilosa cada una, y de 7 a 8% de ramnosa y ácido galacturónico cada uno (Gibson et al., 1990). El mucílago de nopal se considera importante para la industria de alimentos debido a sus propiedades de viscosidad (Sáenz et al., 2006). Tiene la capacidad de formar redes moleculares y retener fuertemente grandes cantidades de agua (Ruiz, et al., 2009), así como de modificar propiedades como viscosidad, elasticidad, textura, retención de agua, además de que es un buen gelificante, espesante, y emulsificante (Alvarez, et al., 2007).

Los nopales tienen sustancias viscosas generalmente conocidas como mucilago o hidrocoloide, que está constituido por carbohidratos de alto peso molecular. Contiene principalmente dos polímeros naturales orgánicos: amilasa (polímero de la glucosa con unión 1-4 tipo alfa consigo misma) y amilopectina (polímero también de la glucosa, pero con uniones 1-6). La amilasa se encuentra formando una cadena helicoidal que en solución tiene la capacidad de formar películas delgadas que, al secar, presentan alta rigidez. La amilopectina, como todo compuesto de alto peso molecular, presenta viscosidad elevada en estado puro, pero es altamente soluble en agua. Combinadas y encontrándose en solución acuosa, ambas pueden formar capas con diferentes propiedades mecánicas y en particular fuertes características de cohesión (Masschelein-Kleiner, 1995).

#### **1.2.6.3 Propiedades del mucilago de nopal**

Los mucilagos en contacto con el agua forman unas dispersiones viscosas y poseen una enorme facilidad de embeberla; propiedad de suma importancia en el mecanismo de retención del agua de las cactáceas. Los mucilagos están contenidos dentro de las grandes células vesiculares de los parénquimas.

En México el mucilago se ha usado con cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) puesto que de acuerdo con Cárdenas et al., (1998) aumenta sus propiedades adhesivas y mejora su repelencia al agua, siendo esta mezcla aplicada en monumentos y edificios históricos.

### **1.3 Plastificantes**

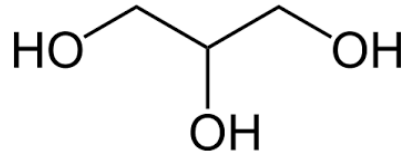
Además de los componentes de naturaleza polimérica, otro componente importante de las películas comestibles son los plastificantes. Estos son moléculas pequeñas de bajo peso molecular, de baja volatilidad. Se usan para mejorar la flexibilidad y la funcionalidad de los recubrimientos.

Dentro de los agentes plastificantes utilizados más frecuentemente se encuentra glicerol, polietilenglicol, sorbitol, aceites, ácidos grasos, ceras, entre otros., siendo el glicerol el plastificante más utilizado en las formulaciones a base de polisacáridos y proteína. Aumenta la flexibilidad de los recubrimientos al aumentar el volumen libre o la movilidad molecular de los polímeros ya que reducen los enlaces de hidrogeno internos entre las cadenas de polímeros. Los polímeros afectan la capacidad de atracción de agua al sistema y generalmente suelen aumentar la permeabilidad al oxígeno en los recubrimientos comestibles (McHugh, et al., 1994; Sothornvit, et al., 2000).

#### **4.1 Glicerol**

El glicerol es un compuesto químico, también llamado glicerina. Es un líquido viscoso, sin olor ni color y ampliamente usado en la industria farmacéutica. El glicerol posee tres grupos hidroxilos que son responsables de su solubilidad

en agua y su naturaleza hidroscolia (figura 3). Es el componente central de algunos lípidos. El glicerol es ligeramente dulce y de baja toxicidad.



**Figura 3: Estructura molecular del glicerol**

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

### **1.3.1 Métodos de elaboración de películas**

#### **1.3.1.1 Método vaciado en placa (film casting)**

Este método consiste en elaborar películas a pequeña escala, utilizada para elaborar películas biodegradables, comestibles y con buenas propiedades mecánicas y fisicoquímicas. En esta técnica, una porción de la suspensión de la película se vierte sobre placas de acrílico, y después se seca en estufa de convección forzada hasta obtener un peso constante (Garcia et al. 1999). Esta sencilla técnica produce películas que se pueden desprender fácilmente de las placas, además de un grosor variable, variando el peso de la suspensión de la película aplicada y el área de la placa sobre la que se vierte la suspensión de polímeros o proteínas.

El método de “film casting” es un proceso de elaboración muy utilizado para la producción de películas poliméricas de alta calidad. Los pasos relevantes del proceso de producción son el estiramiento longitudinal y transversal, en el que el material asume las dimensiones requeridas y sus propiedades mecánicas finales. Una ventaja importante de este método con respecto a otros procesos similares es el enfriamiento de la película relativamente es más rápido y más uniforme, además de la posibilidad de trabajar a temperaturas elevadas o no, dependiendo de las necesidades de la película, teniendo buenos resultados en la productividad, espesor de la película y propiedades ópticas.

# **CAPITULO II**

# **JUSTIFICACIÓN**

## 2. Justificación

El uso desmedido de polímeros y empaques sintéticos, ha llevado a la población a la búsqueda de alternativas para proteger alimentos.

Las películas biopoliméricas son una alternativa utilizada para la protección de alimentos, estas participan en la generación de un microclima que favorece la prolongación de la vida útil del alimento, debido a la modificación de la atmósfera por el control del intercambio gaseoso a través de la membrana, logrando así reducir el uso de protectores o aditivos sintéticos. Las proteínas y polisacáridos destacan entre los materiales poliméricos que más se utilizan como protectores. Una razón importante para utilizar pectina en la formulación de biopelículas es que esta es un heteropolisacárido, de bajo costo, accesible y con propiedades químicas que permiten la elaboración de películas con mejores propiedades físicas entre las que destacan la firmeza.

El mucilago de nopal al igual que la pectina son polisacáridos viscosos, pero el mucilago es un subproducto indeseable en su industrialización del procesamiento de nopal. El Estado de México es una de las zonas productoras de nopal más importantes del país, razón por la cual tienen un precio muy accesible. El mucilago tiene la capacidad de formar redes moleculares y retener fuertemente grandes cantidades de agua, así como de modificar propiedades como viscosidad, elasticidad, textura, retención de agua y es un buen gelificante, espesante, y emulsificante.

Tanto el mucílago de nopal, como la pectina se presentan en forma catiónica (la pectina es un polisacárido complejo de carácter aniónico y se pueden acoplar para la obtención de películas con características físicas deseables de un polímero de recubrimiento. En este trabajo se propuso la elaboración de películas usando mucilago de nopal y pectina, variando la concentración de solidos del mucilago, con la finalidad de estudiar el efecto de la concentración del mucilago en las características mecánicas y fisicoquímicas de las películas.



# **CAPÍTULO III**

## **HIPÓTESIS**

### **3. Hipótesis**

La incorporación de mucilago de nopal en películas elaboradas con pectina y glicerol, permitirá proporcionarles mayor flexibilidad y resistencia a la degradación térmica.

# **CAPÍTULO IV**

## **OBJETIVOS**

## **4. OBJETIVOS**

### **a. Objetivo general**

Elaborar y caracterizar películas elaboradas con mucilago de nopal y pectina, con la finalidad de observar la influencia de la concentración de mucilago en las propiedades fisicoquímicas de las mismas.

### **b. Objetivos específicos**

- Extraer y concentrar el mucilago del nopal que será utilizado para la elaboración de películas
- Preparar mezclas de pectina con mucilago de nopal a diferentes concentraciones
- Evaluar las propiedades físicas de las películas (color y permeabilidad al vapor de agua).
- Determinar las características mecánicas de las películas, mediante análisis de resistencia a la ruptura (elongación y resistencia al rompimiento)
- Realizar la caracterización estructural de las películas, mediante análisis por Microscopía electrónica de barrido (MEB).
- Evaluar las propiedades térmicas de las películas (calorimetría diferencial de barrido y análisis termogravimétrico).

# **CAPÍTULO V MATERIALES Y MÉTODOS**

## **5. Materiales y métodos**

### 5.1 Materiales

#### a) Materias primas

Los nopales se compraron en mercados locales de la ciudad de Toluca de Lerdo, Estado de México, principalmente procedentes de Milpa Alta Estado de México. La pectina cítrica en Botica la Moderna en Toluca. El glicerol, agua destilada y otras materias primas se nos facilitaron en la universidad autónoma del estado de México unidad cerrillo

### 5.2 Métodos

#### 5.2.1 Solución de pectina

Se utilizó una solución de pectina al 2 %; para la preparación de un litro de esta, se pesaron 20 g de pectina cítrica en balanza analítica, que posteriormente se diluyeron en un litro de agua destilada, por 20 minutos a 40 °C, en una parrilla de agitación y con ayuda de un agitador magnético. Una vez diluida la pectina, se dejó reposar 24 horas a temperatura ambiente.

#### 5.2.2 Extracción de mucilago de nopal

Para la extracción del mucilago de nopal se siguió la metodología propuesta por Guadarrama (2016); Se seleccionó nopales tiernos, frescos y exentos de cualquier daño físico o microbiológico aparente, se desinfectaron las piezas enteras por sumersión en solución de hipoclorito de sodio a 100 ppm durante 10 minutos, después se cortó los nopales en trozos pequeños de

1X1 cm, posteriormente a 500 gr de nopal en trozos se les agrego una solución de CaCl<sub>2</sub> al 20% y dejo reposar por 24 horas, finalmente con ayuda de un colador y manta de cielo se separó el mucilago de los trozos de verdura, mantener el mucilago en refrigeración a 4 ° C.

### 5.2.3 Concentración de solidos totales en mucilago de nopal

Se concentró el mucilago Para obtener las diferentes porcentajes de solidos totales utilizados en cada una de las películas, Para ello se utilizó un termobañó a 60 ° C, en el cual se introdujo un vaso de precipitado con 500 ml de mucilago y se fueron tomando muestras cada 2 horas, para la prueba de solidos totales se siguió la metodología de la NMX-F-083-1986, para la cual se tomaron alícuotas de 10 ml de mucilago que se colocaron en charolas de aluminio previamente pesadas, después se introdujeron en estufa de convección forzada precalentada a una temperatura de 115 ° C por 2 horas, posteriormente se colocaron las muestras en un desecador por 1 hora, finalmente se pesaron las muestras hasta tener peso constante.

### 5.2.4 Elaboración de películas

**Tabla 3. Formulación de películas**

Componentes de película					
Película	Agua Cantidad (ml)	Pectina 2% Cantidad (ml)	Mucilago de nopal Volumen (ml)	Concentración de solidos totales	Glicerol Volumen (ml)
P-A-G	20	75	--	--	5
P-G	--	75	--	--	5
P-M5-G	--	75	20	5%	5
P-M8-G	--	75	20	8%	5
P-M10-G	--	75	20	10%	5
P-M12-G	--	75	20	12%	5
P-M14-G	--	75	20	14%	5
P-M16-G	--	75	20	16%	5

P-M22-G	--	75	20	23%	5
P-M23-G	--	75	20	24%	5
P-Pectina 2%	M5-mucilago con 5% de solidos totales		M16-mucilago con 16% de solidos totales		
A-Agua	M8-mucilago con 8 % de solidos totales		M22-mucilago con 22% de solidos totales		
G-Glicerol	M10-mucilago con 10% de solidos totales		M23-mucilago con 23% de solidos totales		
	M12-mucilago con 12 % de solidos totales				

a) Mezcla pectina-glicerol

Se colocaron 75 ml de solución de pectina al 2%, en un vaso de precipitado de 250 ml. Se inició agitación con ayuda de un agitador magnético y una placa de agitación (sin temperatura), en seguida se agregó 5 ml de glicerol a la mezcla y se agitó por 3 minutos. La mezcla se retiró de la placa, se dejó reposar por 30 min y finalmente se hizo vaciado en placas previamente desinfectadas con alcohol etílico. Las películas fueron secadas en una estufa de convección forzada a 35 °C por 24 h.

b) Mezcla pectina-agua-glicerol

Se colocaron 75 ml de solución de pectina al 2%, en un vaso de precipitado de 250 ml. Se inició agitación con ayuda de un agitador magnético y una placa de agitación (sin temperatura), se agregó 5 ml de glicerol a la mezcla y se agitó por 3 minutos, en seguida se adicionaron 20 ml de agua destilada y de igual manera se mezcló por 3 minutos. La mezcla se retiró de la placa, se dejó reposar por 30 min y finalmente se hizo vaciado en placas previamente desinfectadas con alcohol etílico. Las películas fueron secadas en una estufa de convección forzada a 35 °C por 24 h.

c) Mezcla pectina-mucilago-glicerol, variando la concentración de solidos totales en el mucilago.

Se colocaron 75 ml de solución de pectina al 2% previamente elaborada, en un vaso de precipitado de 250 ml. Se inició agitación con ayuda de un agitador magnético y una placa de agitación (sin temperatura), se agregó 5 ml de glicerol a la mezcla y se agitó por 3 minutos, en seguida se



adicionaron 20 ml de mucilago (en diferente concentración de solidos totales para cada una de las películas) y de igual manera se mezcló por 3 minutos. La mezcla se retiró de la placa, se dejó reposar por 30 min y finalmente se hizo vaciado en placas previamente desinfectadas con alcohol etílico. Las películas fueron secadas en una estufa de convención forzada a 35 °C por 24 h.

## **5.2.5 Propiedades físicas de las películas**

### **5.2.5.1 Color**

Para la determinación de color se utilizó un Colorímetro Minolta CR-430 (Tokio, Japón) siendo el diámetro de abertura de 1,5 cm. El colorímetro fue calibrado con placas blanco y negro patrones. Los discos de película de diámetro de 8 cm fueron apoyados sobre placa blancas patrón (Trezza y Krochta, 2000). Las determinaciones de color fueron hechas por triplicado en cada una de las películas, del cual se obtuvo un promedio.

Los parámetros medidos correspondieron al sistema CIE Lab, en el cual  $L^*$  indica luminosidad (0 corresponde a negro y 100 corresponde a blanco), los valores positivos de  $a^*$  indican rojo y los negativos, verde y los valores positivos de  $b^*$  indican amarillo mientras que lo negativos indican azul. Asimismo, se obtuvo la diferencia de color, que se es calculada automáticamente por el equipo.

El índice de amarillo (YI, yellow index) se evaluó de acuerdo a la norma ASTM D1925 (1988) y el índice de color (CI) se determinó con la siguiente ecuación (Murillo-Martinez, et al., 2010):

$$CI = \left( \frac{a \times 1000}{L \times b} \right)$$

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

corresponden a muestras de color amarillo pálido a naranja intenso y entre +20 y +40 indican color desde naranja intenso a rojo oscuro.

### **5.2.5.2 Grosor**

El espesor fue medido en 10 posiciones aleatorias para cada película utilizando un Micrómetro digital (Mitutoyo Corp., Kanogawa, Japón). El promedio de las tres replicas fue considerado el espesor final en mm.

### **5.2.5.3 Solubilidad en agua**

Se utilizó la metodología descrita por Wang, et al., 2007. Muestras de películas fueron cortadas en círculos de 2.5 cm de diámetro y secadas a 100 °C por 24 h para obtener un peso constante. Posteriormente las muestras fueron inmersas en 100 mL de agua destilada por 24 h. Finalmente, las películas remanentes fueron recuperadas por filtración y secadas (100 °C en estufa durante 24 horas) a fin de determinar la masa seca no solubilizada. La solubilidad en agua de las películas fue reportada como pérdida de peso (%) mediante la ecuación (2).

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

### **5.2.5.4 Determinación de permeabilidad al vapor de agua (PVA) en las películas.**

La permeabilidad al vapor de agua (WVP) se calculó por el método estándar ASTM. Las películas ensayadas fueron cortadas en círculos de 54 mm de diámetro y el espesor se midió al azar en al menos 10 puntos con un Micrómetro digital (Mitutoyo Corp., Kanogawa, Japón) en un ambiente con 57,7% de HR a temperatura de 25°C (temperatura ambiente). La celda de permeación consistió en una copa acrílica que contenía solución saturada de NaCl (relación de equilibrio del 75% Humedad) con un

diámetro interno de 51,1 mm colocado dentro de una cámara de permeabilidad al vapor de agua que contiene Sílice (\* 0% de humedad relativa de equilibrio), permitiendo generar una diferencia de presión de 3183,8 Pa. La temperatura se controló a  $30 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Las diferentes muestras se colocaron en la copa, se midieron diferencia de pesos cada minuto por 8 horas.

## **5.2.6 Propiedades mecánicas**

### **5.2.6.1 Resistencia a ruptura**

Las propiedades mecánicas de las películas (resistencia al rompimiento, resistencia al encogimiento y elongación al rompimiento) se calcularon a partir de las curvas tensión-deformación obtenidas de acuerdo con la norma ASTM D638 en un equipo Karg Industrietechnik (Krailling, Alemania). Las pruebas se realizaron a  $25^{\circ}\text{C}$ . Las muestras se cortaron en tiras de 5 x 25 mm. La velocidad de la cruceta se ajustó a 5 mm/min. Al menos 7 mediciones individuales se llevaron a cabo para cada formulación de las películas. Antes de la ejecución de las pruebas mecánicas, las películas fueron condicionadas durante 72 h a 65% de humedad relativa a temperatura ambiente.

## **5.2.7 Estructura de películas**

### **5.2.7.1 Microscopia electrónica de barrido (SEM)**

La superficie y la sección transversal de cada película se analizaron mediante un microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-6380 LV (Tokio, Japón). Las películas se almacenaron previamente en un desecador con P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> con el fin de eliminar la humedad de las películas. Las piezas de cada película (5 x 2 mm) fueron fracturadas por inmersión en nitrógeno líquido y se montaron en dados de cobre. Las superficies de fractura se revistieron con una película de oro de ca. 50 nm y las imágenes

fueron tomadas usando un voltaje de aceleración de 20 kV. Las micrografías se presentaron a diferentes aumentos.

## **5.2.8 Propiedades térmicas**

### **5.2.8.1 Calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en Ingles)**

Se utilizó un calorímetro diferencial de barrido (DSC) marca Mettler Toledo (Modelo 822E), calibrado con indio ( $T_o = 156.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta H = 28.4\text{J/g}$ ). Las muestras se pesaron (entre 4-5 mg) en charolas de aluminio de  $40\text{ }\mu\text{L}$  (Mettler Toledo, ME-27331). La temperatura inicial ( $T_o$ ), la temperatura pico ( $T_p$ ) o de gelatinización ( $T_g$ ), la temperatura final ( $T_f$ ) y la entalpía de transición ( $\Delta H$ ), se obtuvieron directamente usando el software del equipo.

### **5.2.8.2 Análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en Ingles)**

La estabilidad térmica de las películas se evaluó con un equipo NETZSCH 209 F3 (Tarsus, Selb, Alemania) el cual fue calibrado con nitrógeno. Se usaron pesos de 10 y 15 g de cada película. Los análisis de TGA se llevaron a cabo a una velocidad de  $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ , en un rango entre 30 y  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , bajo una atmósfera de nitrógeno ( $20\text{ mL/min}$ ).

# **CAPÍTULO VI RESULTADOS Y DISCUSIONES**

## **6. Resultados y discusiones**

### **6.1 Extracción del mucilago de nopal**

Al utilizar 500 g de nopal en trozos y 500ml de solución de  $\text{CaCl}_2$  20% se obtuvieron 850 ml de mucilago de nopal con una concentración de sólidos totales de 5%.

### **6.2 Caracterización de materias primas**

#### **6.2.1 Concentración de mucilago**

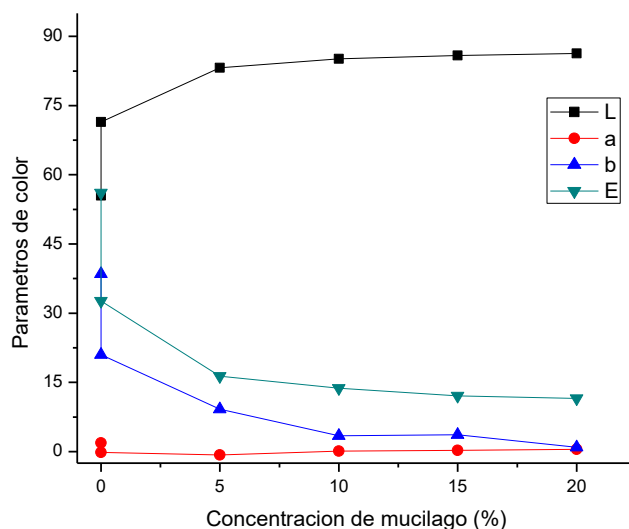
La concentración de mucilago se llevó a cabo durante 10 horas, fue un proceso lento ya que las temperaturas que se efectuaron fueron bajas. Las primeras 3 muestras se tomaron cada 2 horas, mientras que el resto, se obtuvieron cada hora. Se tomó una alícuota de 10 ml para la prueba de sólidos totales, que se realizó en una estufa de convección forzada. Se obtuvieron muestras a diferentes concentraciones de sólidos, sin embargo solo se elaboraron películas con concentraciones seleccionadas.

### **6.3 Elaboración de películas**

Se obtuvieron películas delgadas flexibles, con color verde amarillento

### **6.4 Caracterización física de las películas**

#### **6.4.1 Color**



**Figura 4. Parámetros de Color**

En la gráfica anterior se puede observar que a medida que la concentración de mucilago incrementa, la luminosidad ( $L^*$ ) de las películas también, por lo tanto es una relación directamente proporcional. En este parámetro se obtuvieron valores muy cercanos a 100 (máxima luminosidad), lo cual es deseable ya que implica que las películas permitieron visualizar el fondo blanco de la base en la que fueron apoyadas durante la medición y, por lo tanto, se infiere que las características visuales del alimento al que se aplicarán estas películas no presentaran modificaciones en cuanto a la percepción del consumidor.

Por el contrario para el parámetro  $a^*$  que va del verde al rojo, Los valores obtenidos se encuentran entre 1.8 y -0.7, los valores negativos corresponden a una componente de color ligeramente verde, coloración atribuible a pigmentos clorofilados presentes en el mucilago. La coloración de las películas tienden a ser más verdosas, en comparación de las formulaciones que contienen solamente pectina-agua y glicerol y pectina glicerol.

El  $\Delta E$  se utiliza para estudiar la similitud de color respecto al patrón (placa blanca). El valor más alto (56.08) lo presentó la película P-A-G, debido a su apariencia transparente, la luz de la lámpara traspasa la membrana fácilmente, teniendo un captura similar a la del patrón. Con respecto al resto de las películas el valor de  $\Delta E$  disminuye considerablemente a medida que la

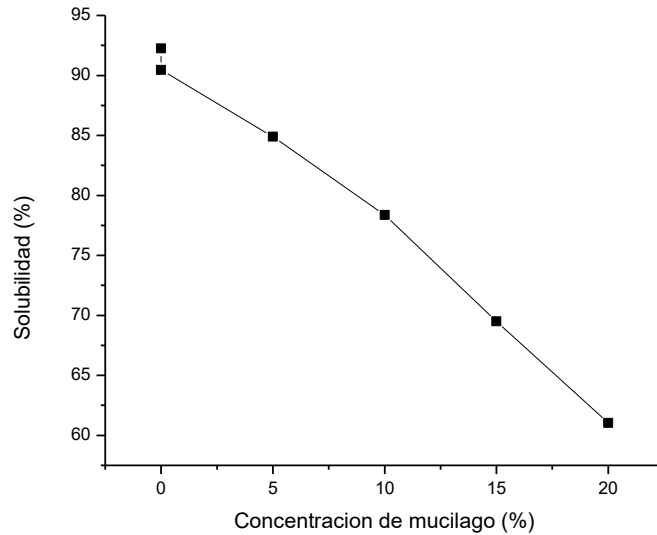
concentración de mucilago incrementa, hasta obtener el valor más bajo que fue de 11.52 correspondiente a la película P-M20-G, esto debido a que el mucilago tiene una ligera coloración verdosa, atribuible a los pigmentos clorofilados que posee, que durante el tratamiento térmico al que se sometió para su concentración cambio de color verde brillante a verde oliva, esto se debe a la formación de feofitina luego del reemplazo del ión  $Mg^{2+}$  del anillo tetrapirrólico de la clorofila por dos iones hidrógeno (Gross, 1991). Por otra parte, los ácidos presentes en el tejido vegetal pueden actuar como catalizadores de la degradación de los pigmentos clorofilados generando este cambio de color en el mucilago de nopal (Migliorisi, 1998), y por tanto en la tonalidad final de las diferentes películas, teniendo como resultado que los valores de  $\Delta E$  disminuyan conforme aumenta la concentración de sólidos totales en el mucilago.

El parámetro  $b^*$  nos muestra tonalidades de colores amarillo (+) y azules (-), en este caso las muestras no presentaron valores negativos, por lo tanto solo se encontraron tonalidades amarillentas, siendo la película P-A-G y P-G las que presentaron los valores más altos, esto debido únicamente a la pectina, ya que en solución tiene tonalidades amarillentas, en el caso del glicerol y el agua no intervienen en este parámetro, ya que son incoloros.

El valor de luminosidad es uno de los parámetros más importantes, ya que de este depende que tan transparente serán las películas y por ende si esta afectara la percepción del producto al que sea aplicada. Comparando este parámetro con películas elaboradas con otros materiales encontramos que Miramont, 2012, reporto valores de luminosidad 88, en películas elaboradas con Carvacrol (antimicrobiano), así como también en películas elaboradas con almidón de yuca obtuvieron valores de 61 (Cortes, et al., 2014), muy cercanos a los obtenidos en esta investigación (55), es importante destacar que el grosor de las películas es un factor importante para la determinación de este parámetro, ya que entre mayor es el grosor menor será la luminosidad, puesto que la luz de la lámpara del equipo tiene una mayor área que atravesar.



### 6.4.2 Solubilidad en agua



**Figura 5. Parámetros de solubilidad**

La solubilidad es la medida o magnitud que indica la cantidad máxima de soluto que pueda homogeneizarse en una cantidad determinada de disolvente, a una temperatura dada (Miramont, 2012). La solubilidad es una característica importante en la aplicación de estas películas, ya que de sus valores dependerá su correcta aplicación, cuando son utilizadas en un alimento con mayor o menor porcentaje de humedad o si son expuestas a atmosferas de distinta humedad relativa. Una película con alto porcentaje de solubilidad vera comprometida su estabilidad si se quiere aplicar en alimentos más húmedos o si el ambiente donde se almacenará es de alta humedad relativa. Sin embargo será deseable su alta solubilidad si la película es pensada para ser consumida junto con el alimento.

En el grafico K se observa una marcada tendencia en la que a medida que la concentración de mucilago se incrementa, la solubilidad de las películas disminuye. Esto es debido a que al concentrar el mucilago de nopal se elimina agua y se concentran sólidos, siendo estos compuestos no volátiles a la temperaturas de 60 °C (temperatura usada en la concentración de mucilago de

nopal), compuestos no solubles en agua como la parte hidrofílica del glicerol, minerales como el  $\text{Ca}^{+2}$ . Además que la baja tasa de disolución indica que existe una mayor cohesión en la matriz polimérica, debida a la formación de numerosos enlaces de hidrógeno entre las cadenas de los polímeros involucrados (Sahbaz et al., 2004).

Sahbaz et al. (2004) Dieron a conocer que el mucilago de nopal disminuye la tasa de solubilidad en agua de las películas, puesto que en películas con contenido de mucilago tuvieron valores menores (57 %) en comparación con las películas que no tenían mucilago (91 %), esto en películas elaboradas a partir de mucilago de nopal-caseinato de sodio y mucilago de nopal-pectina, atribuyendo dicho comportamiento a la existencia de una mayor cohesión de la matriz polimérica, en las películas con mucilago de nopal.

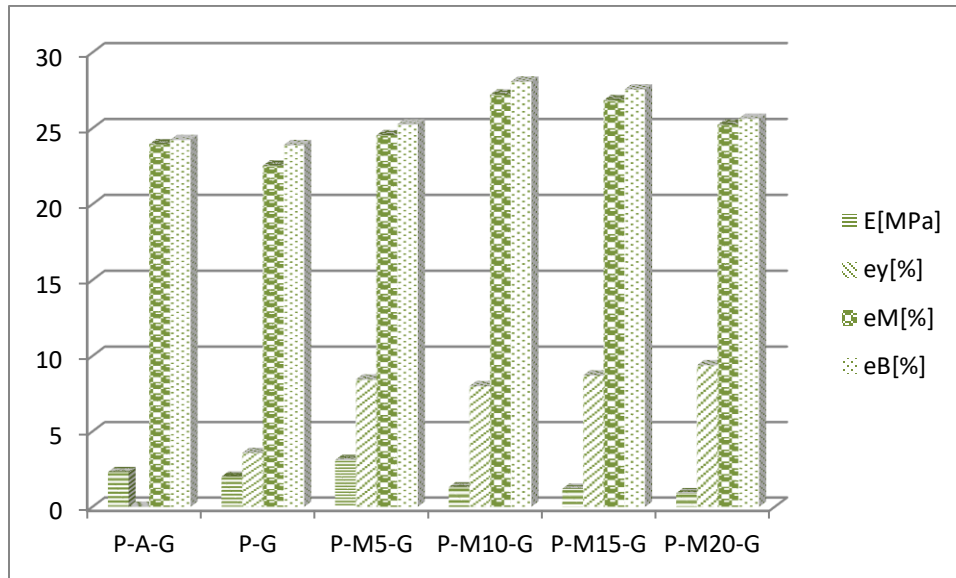
## 6.5 Caracterización mecánica de las películas

### 6.5.1 Tracción

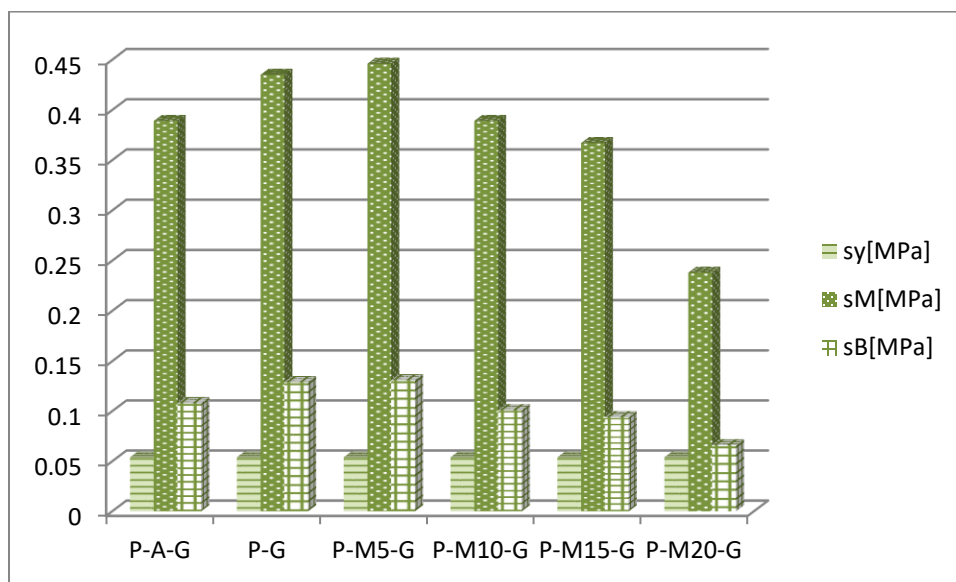
Tabla 4. Propiedades Mecánicas

Muestra	E[MPa]	sy[MPa]	ey[%]	sM[MPa]	eM[%]	sB[MPa]	eB[%]
P-A-G	2.3	0.054	0.005	0.389	23.945	0.108	24.225
P-G	2	0.072	3.568	0.435	22.537	0.129	23.885
P-M5-G	<b>3.1</b>	<b>0.157</b>	<b>8.434</b>	<b>0.446</b>	<b>24.54</b>	<b>0.131</b>	<b>25.25</b>
P-M10-G	1.3	0.112	7.995	0.389	27.212	0.101	28.068
P-M15-G	1.2	0.108	8.702	0.367	26.848	0.094	27.556
P-M20-G	0.9	0.071	9.379	0.238	25.237	0.066	25.624

Módulo de elasticidad (**E**), Esfuerzo en el punto de fluencia (**sy**), Alargamiento en el punto de fluencia (**ey**), Esfuerzo máximo (**sM**), Alargamiento máximo (**eM**), Esfuerzo en el punto de ruptura (**sB**), Alargamiento en el punto de ruptura (**eB**).



**Figura 6. Propiedades mecánicas (E, ey, eM, eB)**



**Figura 7. Propiedades mecánicas (sy, sM, sB)**

Las propiedades mecánicas son de suma importancia ya que pueden dar información de la durabilidad de las películas y de la capacidad de mantener la integridad mecánica de los alimentos (Sothornvit & Krochta, 2005). Las propiedades mecánicas de las películas en general se asocian en gran medida con la naturaleza y la estructura química de los materiales formadores de película (Ahmad, 2015).

En los resultados obtenidos, la película que presento mayor elasticidad fue P-M5-G (5% de s.t. mucilago de nopal) obteniendo un valor de 3.1 MPa, se observó que a medida que se incrementa la concentración de solidos totales de mucilago, la elasticidad disminuye, siendo la película P-M20-G (20% de s.t. mucilago) la que presento menor elasticidad con 0.9 MPa, esta tendencia es atribuible a la cristalización de los azúcares presentes en el mucilago de nopal, formando únicamente interacciones con puentes de hidrogeno entre grupos amino de las proteínas y grupos carboxilo del mucilago, los cuales son enlaces débiles y disminuyen la elasticidad de las películas (Damodaran, 2013).

En el parámetro  $\sigma_y$  que el esfuerzo máximo que se puede desarrollar en un material sin causar una deformación plástica, todas las películas presentaron valores bajos, la película que resiste valores más altos fue la P-M5-G con 0.157 MPa. Pudiendo ser atribuible a una buena disposición estructural de los átomos además de que en las micrografías MEB fue la que presento menos imperfecciones estructurales.

El esfuerzo máximo ejercido fue en la película P-M5-G con 0.446 MPa, lo que sugiere que es una película firme, con una microestructura estable, por lo contrario la película P-M20-G presento el menor  $\sigma_M$  con 0.238 MPa.

En el parámetro  $e_M$  las propiedades de tracción de las películas son dadas por Interaccion entre los grupos funcionales de la proteína (pectina) y los carbohidratos (azúcares del mucilago del nopal), siendo la película P-M10-G las que presento mayor tracción 27.2 % y P-G la menor con un 22.5%.

En el esfuerzo en el punto de ruptura la película P-M5-G presento una mayor resistencia, mientras que la película P-M20-G con apenas 0.066 MPa, fue la que presento menos resistencia.

Los porcentajes de alargamiento en el punto de ruptura (eB) fueron valores similares entre 23 y 28%, siendo la películas P-M10-G la que presento una mayor resistencia al alargamiento con un 28.068%. En diversos estudios han reportado que el glicerol ayuda a que las películas sean menos quebradizas y les confiere mayor flexibilidad, esto debido al efecto global del reemplazo de interacciones polímero-polímero por interacciones plastificante-polímero (Karbowiak et al., 2006) y al mecanismo de plastificación, ya que los plastificantes como el glicerol tienen la capacidad de enlazar moléculas de agua a la estructura polimérica y reducen de esta forma la interacción entre sus cadenas y generan de tal forma un espacio inter e intramolecular denominado “volumen libre” lo que provoca una mayor movilidad entre las cadenas (Zhang et al., 2006) . Aunado a esto se ha visto también que disminuye la fuerza tensil y aumenta el porcentaje de elongación (Quiu-Ping et al., 2008). En cuanto a la pectina se ha reportado que su utilización incrementa la fuerza tensil de las películas (Talja et al., 2008). Sin embargo en este estudio solo se varió la concentración de solidos totales en el mucilago de nopal y de acuerdo a los resultados obtenidos podemos decir que en concentraciones de 5% y 10% de solidos totales el mucilago, confiere mayor elasticidad, mayor resistencia a la ruptura, aumenta el valor de esfuerzo mayor, aumenta el porcentaje de esfuerzo en el punto de ruptura, presenta un buen porcentaje de alargamiento máximo y de alargamiento en el punto de ruptura, que están asociados a la matriz homogénea por una fuerte unión entre las cadenas del polímero y la estructura de la pectina. Sin embargo el mucilago con concentraciones mayores de solidos totales (15% y 20%) no proporcionan mejoras en las propiedades mecánicas de las películas, ya que estas se presentan quebradizas, con baja elasticidad, baja resistencia a la ruptura, bajos porcentajes de alargamiento. Lo que sugiere que la alta concentración de solidos totales en el mucilago de nopal interviene en la formación de una película estable, con una gran cantidad de fracturas que disminuyen la eficiencia de las mismas en cuanto a propiedades mecánicas se refiere.

## 6.6 Caracterización térmica de las películas

### 6.6.1 ANALISIS TERMO GRAVIMETRICO (TGA, por sus siglas en Ingles)

**Tabla 5. Propiedades térmicas de las películas**

Muestra	Temperatura de descomposición (°C)		DTG	Entalpia de fusión (J/g)	
	T <sub>-5° c</sub>	T <sub>-50° c</sub>	T <sub>máx</sub>	Pérdida de peso (%pp)	ΔHm
<b>P-A-G</b>	65	210	285	96.7	213
<b>P-G</b>	95	215	290	93.4	217
<b>P-M5-G</b>	85	250	293	88.1	258
<b>P-M8-G</b>	80	250	297	84.82	275
<b>P-M10-G</b>	75	235	302	83.4	237
<b>P-M12-G</b>	90	245	305	84.8	267
<b>P-M14-G</b>	95	250	305	82	268
<b>P-M16-G</b>	80	250	305	78.6	242
<b>P-M22-G</b>	80	265	308	71.4	264
<b>P-M23-G</b>	85	270	310	70.8	259

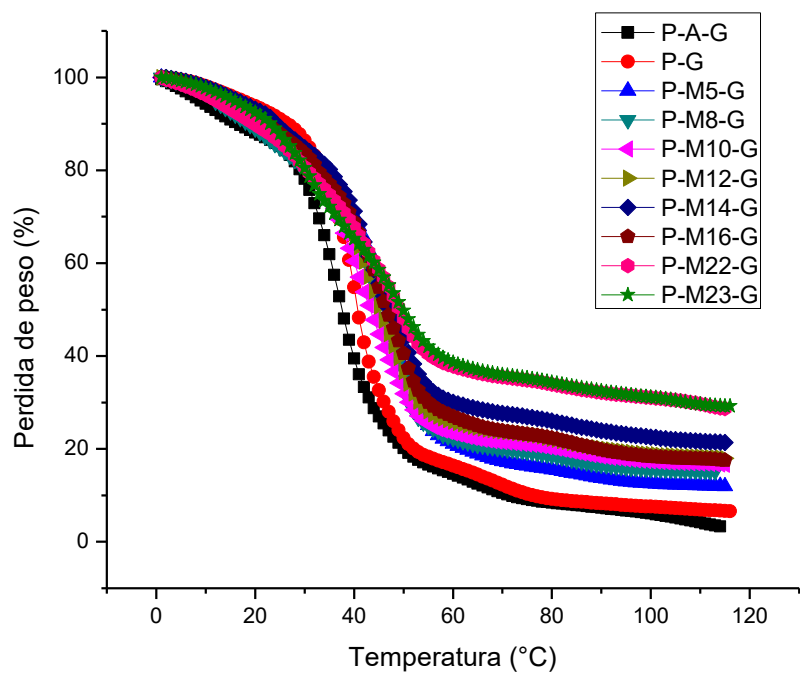
P-Pectina 2%      M5-mucilago con 5% de solidos totales      M16-mucilago con 16% de solidos totales  
A-Agua            M8-mucilago con 8 % de solidos totales            M22-mucilago con 22% de solidos totales  
G-Glicerol        M10-mucilago con 10% de solidos totales        M23-mucilago con 23% de solidos totales  
                          M12-mucilago con 12 % de solidos totales

El análisis termogravimétrico determina los cambios de peso de la película con el incremento de la temperatura. El TGA permite conocer la resistencia del material de empaque con la determinación de la variación de peso del material (pérdida o ganancia) en función de la temperatura y el tiempo mientras la muestra es sometida a un incremento controlado de la temperatura (Espitia et al., 2014). Esta determinación en las películas define las condiciones de temperatura a la cual el material comienza a descomponerse.

La tabla 5 muestra los valores de la temperatura inicial de degradación (T<sub>-5</sub>), la temperatura a la cual se produce una pérdida de peso al 50% (T<sub>50</sub>), temperatura máxima de descomposición (T<sub>máx</sub>) y la pérdida de peso porcentual (%pp). En la tabla se observa que la temperatura máxima de degradación es de 310 °C y la presenta la película P-M23-G, así como también presenta la mayor T<sub>50</sub> lo que sugiere que existe una interacción física entre los materiales o de igual manera

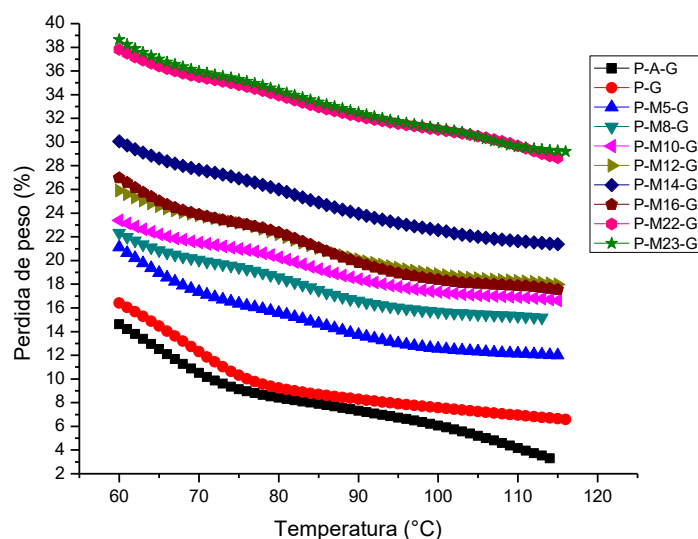
puede ser atribuible al alto peso molecular del mucilago de nopal que oscila alrededor de  $13 \times 10^6$  y  $4.3 \times 10^6$  Dalton (Cárdenas et al. 1997; Trachtemberg et al. 1981). Se observa un aumento de temperatura de degradación a medida que la concentración de sólidos totales en el mucilago de nopal incrementa, es claro que en las muestras con mayor concentración de sólidos totales tenemos menor porcentaje de agua, el agua actúa como conductor de calor por lo que en las películas con mayor cantidad de moléculas de agua la degradación se llevó a cabo a temperaturas más bajas, siendo que el agua se degrada a temperaturas de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  así como también se pierden los enlaces de hidrógeno entre los grupos hidroxilo del glicerol, el agua, el mucilago. Las temperaturas mayores de degradación  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  probablemente pertenecen a las sustancias inorgánicas y orgánicas oxidadas, tales como calcio resultante de la extracción de mucilago.

La variación de entalpía del sistema es igual a la energía absorbida durante la reacción, siendo los valores positivos, se dice que se gana calor, siendo las reacciones endotérmicas. Se ha aceptado que los valores  $\Delta H_m$  reflejan el grado de cristalinidad en la estructura (Liu et al., 2011). Estos valores, podrían estar relacionados con las interacciones polisacárido-polisacárido entre mucilago y pectina que muestran que se requiere mayor entalpía de fusión ( $\Delta H_m$ ) para transformar la estructura estable y compacta de esas películas.



**Figura 8. Análisis TGA-parámetros de pérdida de peso**





**Figura 9. Ampliación de figura 7- tercera etapa**

En el análisis termo gravimétrico se observó una tendencia de mayor a menor pérdida de peso, que tiene sentido al saber que en el mismo orden se incrementa el porcentaje de sólidos totales. La pérdida de peso se presentó en tres etapas en todas las muestras analizadas, el primer registro de pérdida de peso se dio entre las temperaturas de 70 y 220 °C, la cual fue asociada a la pérdida de sustancias de bajo peso molecular tales como agua y glicerol en las películas. La segunda etapa de pérdida se dio entre 180 y 260 °C para las películas que carecían de mucilago en su formulación (muestra P-G y P-A-G), mientras que para el resto de películas la segunda etapa de pérdida de peso radica entre 220 y 280 °C. La pérdida de peso en esta etapa se puede atribuir a la descomposición de la matriz polimérica, ya que el mucilago es un heteropolisacárido de alto peso molecular con al menos 30,000 sub unidades de azúcares, siendo necesaria temperaturas mayores para su degradación. La tercera pérdida de peso se presentó entre 280-420 °C para las muestras P-G Y P-A-G (sin mucilago) y 300-500 °C para el resto de formulaciones, esta pérdida de peso se atribuyó a la deshidratación intermolecular a levoglucosano (compuesto orgánico presente en la quema de biomasa) y algunos productos volátiles, tales como dióxido de carbono, aldehídos inferiores, furano, metilo y cetonas, grupos funcionales presentes en los carbohidratos (azúcares) del

mucilago de nopal y en la estructura química de la pectina (Liu et al., 2013; Castaño et al 2014). Sin duda alguna la película que presento mayor porcentaje de pérdida de peso (96.7%) fue P-A-G, esto debido a que contenía un mayor porcentaje de agua en la formulación y esta se pierde fácilmente, mientras que la que tuvo menor perdida fue P-M24-G ya que se utilizó mucilago de nopal concentrado en 24% de solidos totales, teniendo menos cantidad de materia orgánica que perder, se presentó menor pérdida de peso.

### 6.6.2 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

Tabla 6. Termogramas de degradación y DSC

Muestra	Termogramas °C	DSC (mW/mg)
P-A-G	193.4	3.434
P-G	186.0	5.38
P-M5-G	190.9	2.938
P-M10-G	196.4	10.5
P-M15-G	199.6	7.736
P-M20-G	206.1	10.14

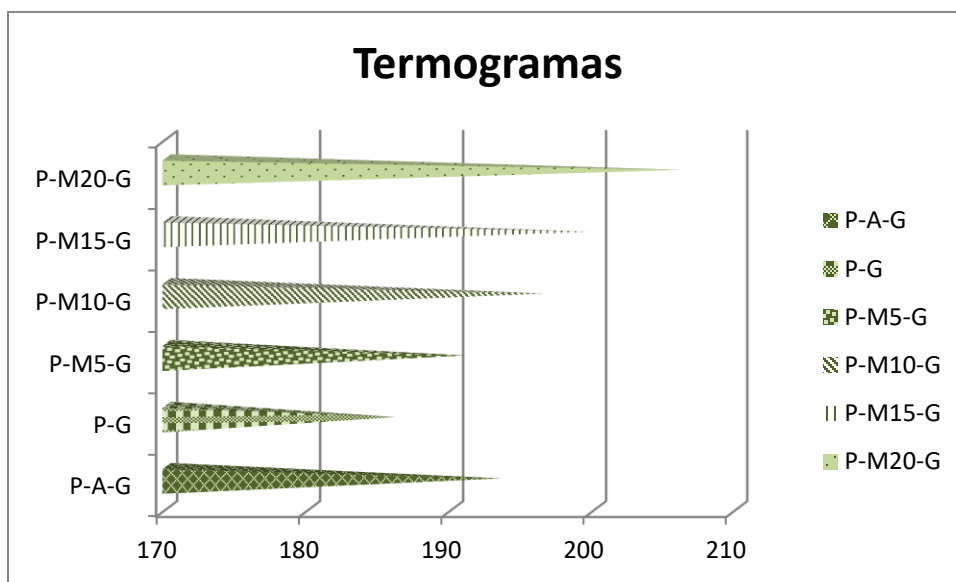


Figura 10. Termogramas de degradación

La calorimetría diferencial de barrido es una técnica empleada para el estudio del comportamiento de polímeros cuando estos se someten a altas temperaturas, analizando las *transiciones térmicas*, que son cambios que tienen lugar en un polímero.

Los picos endotérmicos de las muestras analizadas están en un rango entre 186 y 206.1 ° C, lo que nos muestra la temperatura a la que se lleva a cabo la desnaturalización térmica de las proteínas. La principal fuente de proteína en la formulación de las películas, es el mucilago de nopal, que según el Instituto Nacional de Nutrición llega a tener hasta 1.7 g por cada 100 g, mientras que en la pectina solo se encuentra 0.3 g por cada 100g. La ruptura de enlaces intermoleculares de hidrogeno y la perdida de interacciones hidrofóbicas del glicerol se presentan mediante una reacción endotérmica (Branchu, 1999).

La películas P-G y P-A-G tienen temperaturas de degradación similares (186 y 193.4), la película que contiene agua en su formulación presenta una temperatura mayor atribuible a las interacciones intermoleculares de hidrogeno que se forman las matriz polimérica y el agua. Las películas con contenido de

mucilago de nopal presentan un incremento en la temperatura de degradación con forme aumenta la concentración de solidos totales, temperaturas que van de los 190 a 206.1 °C, el aumento de temperatura de degradación es atribuible a la cristalización de los azucares presentes en el mucilago de nopal (Liu et al., 2013; Castaño et al 2014).

## 6.7 Caracterización estructural de las películas

### 6.7.1 Espectrofotometría electrónica de barrido

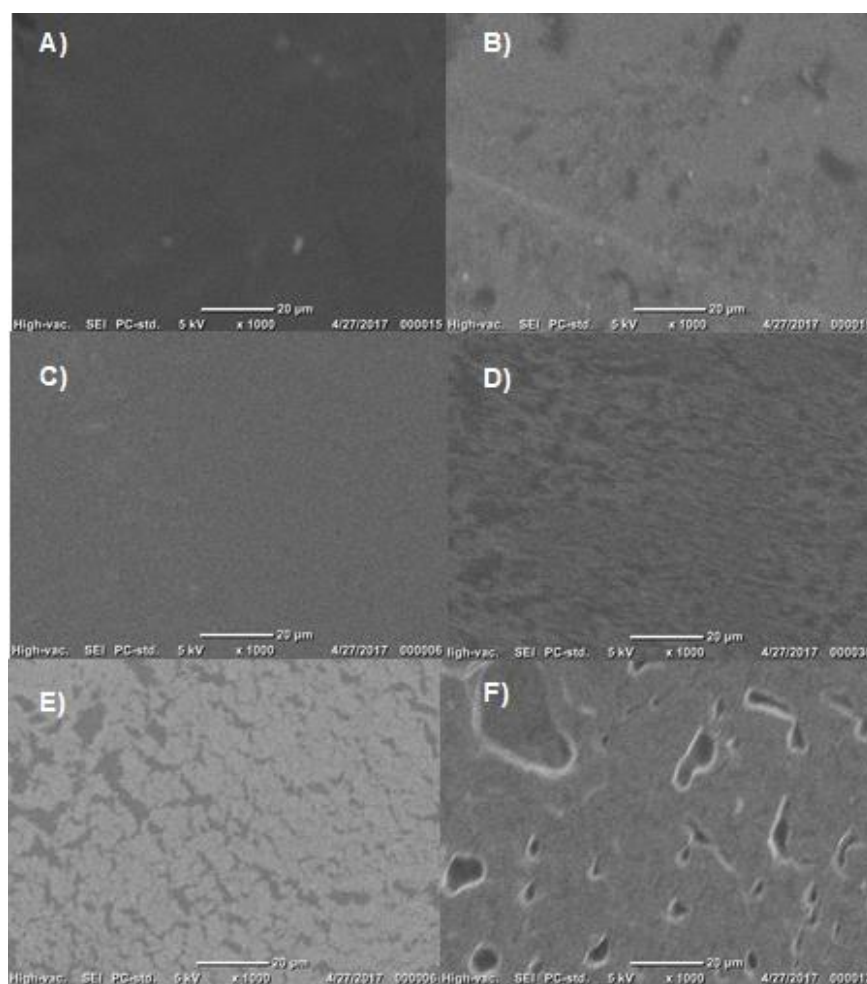


Figura 11. Microestructura de las diferentes películas: (a) pectina-agua-glicerol, (b) Pectina-Glicerol, (c) Pectina-mucilago 5% solidos totales-glicerol, (d) Pectina-mucilago 10% solidos totales-glicerol, (e) Pectina-mucilago 15% solidos totales-glicerol y (f) Pectina-mucilago 20% solidos totales-glicerol.

**Figura 11. Micrografías MEB**

La figura 11 muestra las micrografías de la superficie de las películas obtenidas con las diferentes formulaciones. Las películas P-A-G y P-G (micrografías A y B) las cuales carecían de mucilago de nopal en su formulación, se caracterizaron por presentar una estructura lisa, homogénea, sin huecos o fracturas, con presencia de partículas blancas, que pueden ser remanentes del tejido fibroso del nopal.

La película C, la cual contiene mucilago de nopal con un 5% de solidos totales, presenta una microestructura compacta y lisa, formando una red homogénea con tonalidad uniforme. En las películas D, E y F se observa que a medida que se incrementa la concentración de mucilago se observan agrietamientos en su estructura, hasta visualizar dos componentes diferentes totalmente separados (micrografía F), Según Zhou et al. (2009), una superficie rugosa o fracturada podría ser debida a la presencia de un material semicristalino. Dichos resultados concuerdan con lo obtenido en la prueba de solubilidad donde a medida que aumenta la concentración de solidos totales en el mucilago de nopal, este se hace menos soluble, por lo que se le es más difícil incorporarse al resto de componentes (pectina y el glicerol), para la formación de una red homogénea y por lo tanto una película de características optimas estructuralmente.

La microestructura se rige por la organización molecular en la red de la película, que depende de los tipos de componentes, la interacción de los componentes en la matriz de la película, así como la relación de la mezcla de los componentes utilizados para la elaboración de la película (Ahmad et al., 2015).

Las formulaciones pectina-agua-glicerol y pectina-glicerol, forman una estructura homogénea pero frágil, ya que se forma una red unida únicamente por puentes de hidrogeno (Altenhofen et al., 2009).

## 6.8 Permeabilidad al vapor de Agua

Tabla 7. Permeabilidad de vapor de Agua

Película	Promedio	desviación
P-A-G	1.4031E-09	2.97649E-10
P-G	2.2998E-09	3.58001E-11
P-M5-G	1.6316E-09	3.28685E-10
P-M10-G	1.5983E-09	1.78558E-10
P-M15-G	1.5561E-09	3.8048E-12
P-M20-G	1.4915E-09	1.50955E-10

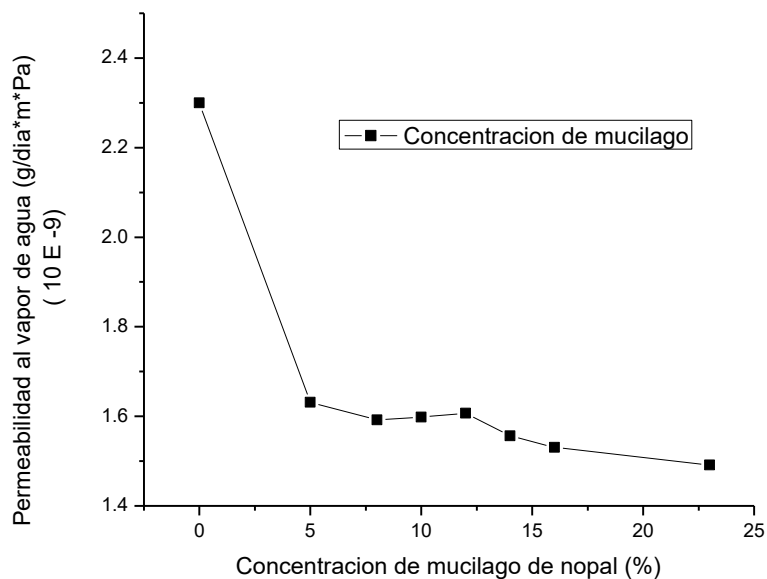


Figura 12. Parámetros de PVA

En la figura 12 se presenta la permeabilidad al vapor de agua de las películas elaboradas con mucilago de nopal.

La permeabilidad al vapor de agua es una propiedad ampliamente estudiada debido al papel que juega el agua en las reacciones deteriorativas de los alimentos. La permeabilidad del agua está relacionada a la difusividad y a la solubilidad del material en el agua; si el material es altamente soluble en agua, la permeabilidad será menor (Ayranci, et al., 2003; Rojas et al., 2007).

En la gráfica se puede observar que la película que presentó mayor permeabilidad de agua fue la muestra P-G que está compuesta únicamente por pectina y glicerol. El glicerol tiene la capacidad de reducir las interacciones entre biopolímeros, lo que incrementa el espacio intermolecular y por lo tanto la permeabilidad de las películas. Además, dicho plastificante, al ser una molécula hidrofílica favorece la adsorción-desorción de las moléculas de agua, (Rodríguez et al., 2006).

Debido a que la cantidad de glicerol fue constante en todas las formulaciones, en la película P-G (pectina y glicerol), al no tener mucilago de nopal, el porcentaje de los componentes se incrementa, es decir solo existen interacciones entre pectina-glicerol y al estar ocupados los hidroxilos del glicerol con la pectina, el agua ya no tiene forma de interaccionar y traspasa la membrana, es decir presenta una mayor permeabilidad al vapor de agua.

La película P-A-G (Pectina-Agua-Glicerol) fue la que presento menor PVA (1.4301 E-9), en la formulación de dicha película se agregó agua. Esta tiene un papel muy importante dentro de la formulación, ya que que los cationes ( $H^+$ ) de las moléculas de agua interaccionan con la pectina que tiene una carga neta negativa, los grupos hidroxilos del glicerol y las cargas negativas del mucilago (grupos carboxilos), mientras que los aniones ( $O^{+2}$ ) que tienen afinidad por las cargas positivas, quedan disponibles para interaccionar con los hidrógenos de las moléculas de agua que intentan permear la película, al generarse estos puentes de hidrogeno, el agua no migra y se queda retenida en la película, lo que genera un hidratación de la misma, pero una baja permeabilidad.

En el resto de la películas se observa que disminuye la permeabilidad al vapor de agua conforme aumenta el porcentaje de mucilago de nopal en las formulaciones de películas, esta característica es atribuible a la capacidad absorbente que tiene el mucilago, este hidrocoloide se asemeja a una red, con una estructura capaz de sostener grandes cantidades de agua (McGarvie et al, 1979; Ting, 1997). Varios estudios sobre su estructura y composición han reportado que el mucilago es una sustancia polimérica compleja y ramificada, con composición muy similar a la pectina, que contienen grupos carboxilos libre capaces de interaccionar y retener las moléculas de agua en grandes cantidades, siendo así, es evidente que lo resultados de PVA disminuyan la permeabilidad con forme la concentración de mucilago aumenta, ya que al tener mayor cantidad de mucilago las moléculas de agua que se retienen en la película son entonces mayores con respecto a las formulaciones con menor contenido de mucilago.

# **CAPÍTULO VII**

# **CONCLUSIONES**



## 7. Conclusiones

El estudio del efecto de la concentración de mucilago de nopal en las propiedades fisicoquímicas y mecánicas en películas elaboradas con pectina y glicerol nos mostró lo siguiente. En los parámetros de color el mucilago confiere una tonalidad verdosa a las películas en comparación con aquellas que no contenían mucilago de nopal, al aumentar la concentración de mucilago la coloración mostro una mayor acentuación. En cuanto a solubilidad se mostró una marcada tendencia en la que las películas disminuían la solubilidad a medida que la concentración de solidos de nopal aumentaba. Se encontró que a concentraciones de 5% de solidos totales de mucilago las películas presentan muy buenas características mecánicas tales como mejor elasticidad, tracción, mayor alargamiento y resistencia al esfuerzo máximo, además de que forman una red homogénea de estructura lisa y compart, sin presencia de rupturas, por el contrario a concentración de 20% de solidos las micrografías obtenidas muestran películas fracturadas y con propiedades mecánicas no favorables para la aplicación en la conservación de alimentos. Mientras tanto en las propiedades térmicas las películas con altas concentraciones de mucilago presentaron mejor resistencia a la degradación térmica, en comparación con las películas sin mucilago y aquellas que contenían bajas concentraciones de este. En cuanto a la permeabilidad al vapor de agua se obtuvo que a mayor concentración de mucilago en las películas la permeabilidad de las mismas disminuye. Una vez caracterizadas las muestras, se puede decir que la película elaborada mucilago de nopal en concentraciones de 5% es la más apta para como una alternativa en el recubrimiento de alimentos.

# **CAPÍTULO VIII**

## **REFERENCIAS**

### **BIBLIOGRÁFICAS**

## 8. Referencias