



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



**“ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES Y  
FISICOQUÍMICAS DE MEZCLAS GOMA DE MEZQUITE-  
MUCÍLAGO DE NOPAL”**

**Tesis que presenta:**

**ARACELI MEJÍA ALCÁNTARA**

**Para obtener el título de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**Director de tesis:**

**DR. CÉSAR PÉREZ ALONSO**

**TOLUCA, MÉXICO, MARZO 2022**

# **AGRADECIMIENTOS**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A la Universidad Autónoma del Estado de México por financiar esta tesis mediante el proyecto con clave 6160/2020/CIB, “Diseño, desarrollo y evaluación de hidrogeles de alginato de sodio - mucílago de nopal para la incorporación de cápsulas esporopolenina-aceite de chía mediante la tecnología de gelación iónica”*

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b>	<b>8</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
<b>1. ANTECEDENTES</b>	<b>12</b>
<b>1.1. Biopolímeros</b>	<b>12</b>
<b>1.1.1. Gomas y mucílagos</b>	<b>13</b>
<b>1.1.2. Gomas</b>	<b>16</b>
<b>1.1.2.1. Goma de mezquite</b>	<b>18</b>
<b>1.1.3. Mucílagos</b>	<b>21</b>
<b>1.1.3.1. Mucílago de nopal</b>	<b>21</b>
<b>1.1.4. Importancia de gomas y mucílagos</b>	<b>24</b>
<b>1.1.5. Mezclas de biopolímeros</b>	<b>25</b>
<b>1.2. Características fisicoquímicas de los biopolímeros</b>	<b>30</b>
<b>1.2.1. Solubilidad en agua</b>	<b>31</b>
<b>1.2.2. Capacidad de retención de agua y aceite</b>	<b>32</b>
<b>1.3. Propiedades funcionales de los biopolímeros</b>	<b>33</b>
<b>1.3.1. Capacidad emulsionante</b>	<b>34</b>
<b>1.3.2. Capacidad espumante</b>	<b>38</b>
<b>1.4. Sistemas coloidales</b>	<b>40</b>
<b>1.4.1 Coloides en industria alimentaria</b>	<b>41</b>
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>43</b>
<b>3. HIPÓTESIS</b>	<b>45</b>
<b>4. OBJETIVOS</b>	<b>47</b>
<b>5. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>49</b>
<b>5.1. Materiales</b>	<b>49</b>
<b>5.2. Extracción de mucílago de nopal</b>	<b>49</b>
<b>5.3. Caracterización fisicoquímica de las mezclas GM-MN</b>	<b>50</b>
<b>5.3.1. Solubilidad en agua</b>	<b>50</b>

5.3.2. Capacidad de retención de agua	50
5.3.3. Capacidad de retención de aceite	51
5.4. Propiedades funcionales de las mezclas GM-MN	51
5.4.1. Propiedades emulsionantes	51
5.4.1.1. Capacidad emulsionante	51
5.4.1.2. Estabilidad emulsionante al calentamiento	52
5.4.1.3. Índice de emulsiónamiento $E_{24}$	52
5.4.2. Propiedades espumantes	53
5.4.2.1. Capacidad espumante	53
5.4.2.2. Estabilidad espumante	53
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>55</b>
6.1. Rendimiento del mucílago de nopal en polvo	55
6.2. Caracterización fisicoquímica de las mezclas GM-MN	56
6.2.1. Solubilidad en agua	56
6.2.2. Capacidad de retención de agua	57
6.2.3. Capacidad de retención de aceite	57
6.3. Propiedades funcionales de las mezclas GM-MN	59
6.3.1. Propiedades emulsionantes	59
6.3.1.1. Capacidad emulsionante	59
6.3.1.2. Estabilidad emulsionante al calentamiento	60
6.3.1.3. Índice de emulsiónamiento $E_{24}$	61
6.3.2. Propiedades espumantes	62
6.3.2.1. Capacidad espumante	62
6.3.2.2. Estabilidad espumante	63
6.4. Posibles aplicaciones de mezclas de GM-MN en el desarrollo de alimentos	64
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>67</b>
<b>8. REFERENCIAS</b>	<b>70</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig.</b>		<b>Pág.</b>
<b>1.</b>	Clasificación de biopolímeros según su origen.	<b>12</b>
<b>2.</b>	Distribución de árboles de mezquite ( <i>Prosopis</i> spp.) en México	<b>18</b>
<b>3.</b>	Índice de emulsionamiento ( $E_{24}$ ) a diferentes valores de pH (5, 7 y 9) de GM, MN y mezclas GM-MN.	<b>61</b>
<b>4.</b>	Propiedades espumantes de GM, MN y mezclas GM-MN, (a) capacidad espumante y (b) estabilidad espumante en función del tiempo.	<b>63</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>No.</b>		<b>Pág.</b>
<b>1.</b>	Clasificación de gomas.	<b>13</b>
<b>2.</b>	Clasificación de mucílagos.	<b>14</b>
<b>3.</b>	Clasificación de los hidrocoloides.	<b>16</b>
<b>4.</b>	Solubilidad del mucílago del Opuntia Ficus Indica en algunos solventes, ácido y bases a temperaturas de 25 °C, 40 °C y 60 °C.	<b>22</b>
<b>5.</b>	Ejemplos de mezclas de biopolímeros y sus efectos encontrados.	<b>25</b>
<b>6.</b>	Solubilidad en agua de la GM, MN y mezclas GM-MN.	<b>55</b>
<b>7.</b>	Capacidad de retención de agua y capacidad de retención de aceite de la GM, MN y mezclas GM-MN.	<b>58</b>
<b>8.</b>	Propiedades emulsionantes de la GM, MN y mezclas GM-MN.	<b>60</b>

## RESUMEN

En este trabajo se planteó el objetivo de analizar las propiedades funcionales y fisicoquímicas de dos biopolímeros, goma de mezquite (GM) y mucílago de nopal (MN), y de sus mezclas en proporciones 75-25, 50-50 y 25-75 como posibles agentes formuladores de sistemas coloidales. Primeramente, se realizó la extracción del mucílago de nopal mediante un proceso fisicoquímico, a partir de cladodios de nopales (*Opuntia ficus indica*) obteniendo un rendimiento promedio de extracción de  $16.2 \pm 1.0\%$ , base seca (b.s.). Posteriormente se realizó la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de dispersiones acuosas de GM, MN y sus mezclas. La solubilidad en agua a  $20^{\circ}\text{C}$  con el mayor valor fue para la GM (84.30%), los valores decrecieron conforme la concentración de GM disminuyó en la mezcla. Las pruebas de capacidad de retención de agua (CRA) y capacidad de retención de aceite (CRAc) mostraron que a mayor concentración de MN hubo mayor CRA y CRAc, por lo que, el MN presentó el valor más alto con resultados de  $2.46 \pm 0.07$  g de agua/ g de polvo y  $1.75 \pm 0.05$  g de aceite/ g de polvo respectivamente, con base en estos resultados se concluyó que el mucílago de nopal puede usarse como un ingrediente funcional en alimentos formulados para evitar la sinéresis.

Por lo que concierne a las propiedades funcionales, se determinó la capacidad emulsionante (CE) teniendo como valor más alto a la GM (98.40%), los valores disminuyeron conforme la composición de la GM disminuía en las mezclas. La estabilidad emulsionante al calentamiento (Eemu) y el índice de emulsiónamiento  $E_{24}$  obtuvieron los valores más altos con la mezcla 75-25 GM-MN, que fueron 69.38% y 41.9% respectivamente, en ambos casos conforme disminuyó la concentración de GM disminuyeron los valores de Eemu y  $E_{24}$ . En contraste, para la capacidad espumante (CEsp) el MN obtuvo los mayores valores (43%) y a medida que disminuyó la concentración de MN decreció la CEsp. La GM y la mezcla 75-25 GM-MN no presentaron CEsp lo que puede ser debido a su baja viscosidad.

Los resultados muestran que las mezclas GM-MN tienen buenas propiedades gelificantes, estabilizantes o espesantes para ser aplicados en la industria alimentaria.



## INTRODUCCIÓN

A través de los años se han obtenido una gran variedad de nuevos aditivos alimentarios para satisfacer las necesidades de la producción alimentaria, lo cual día a día representa un reto para los investigadores buscando nuevos productos que posean propiedades funcionales y características fisicoquímicas apropiadas para su aplicación. Los polisacáridos son ampliamente utilizados como agentes emulsionantes, estabilizantes, espesantes, gelificantes, entre otros, los cuales se utilizan en la industria alimentaria por su capacidad para modificar las propiedades funcionales de los sistemas alimentarios, los nuevos conocimientos a nivel molecular sobre la química y las propiedades funcionales de los polisacáridos han permitido una mejor selección del biopolímero apropiado de acuerdo con las necesidades específicas de la industria. En los alimentos, los polisacáridos participan en la formación de diversos estados coloidales. Los sistemas coloidales son usados en numerosas áreas científicas e industriales, en ambos ámbitos se aprovecha la estabilidad de los sistemas coloidales con el fin de mejorar e incluso encontrar nuevas aplicaciones de determinados materiales.

En este trabajo se estudio al mucílago de nopal (MN) y la goma de mezquite (GM). El mucílago de nopal es extraído de los cladodios de nopal, el cual cuenta con una amplia distribución geográfica en México lo cual da una alta biodisponibilidad del material. Este mucílago ya ha sido previamente analizado por algunos autores, mencionando que el mucílago tiene propiedades notables como aditivo funcional que se puede usar en varias industrias, por lo que su estudio como aditivo alimentario resulta atractivo e interesante. Por otra parte, la goma de mezquite proviene del árbol de mezquite que es nativo de zonas áridas y semiáridas, de las cuales México cuenta con aproximadamente el 40% de su superficie total. Este polisacárido es una arabinogalactana proteica cuyas propiedades químicas, macromoleculares y funcionales son similares a las de la goma arábica, la cual es aceptada para ser usada como aditivo alimentario, producto de múltiples usos industriales en alimentos, bebidas y farmacia.

El objetivo de este trabajo fue el análisis de las propiedades funcionales y fisicoquímicas de las mezclas GM-MN para encontrar un posible efecto sinérgico de ambos biopolímeros en sus propiedades funcionales lo que permitiría formar sistemas coloidales, y así proponer nuevos sistemas de aditivos para su aplicación en el desarrollo de alimentos para la industria.

## ***ANTECEDENTES***

## **1. ANTECEDENTES**

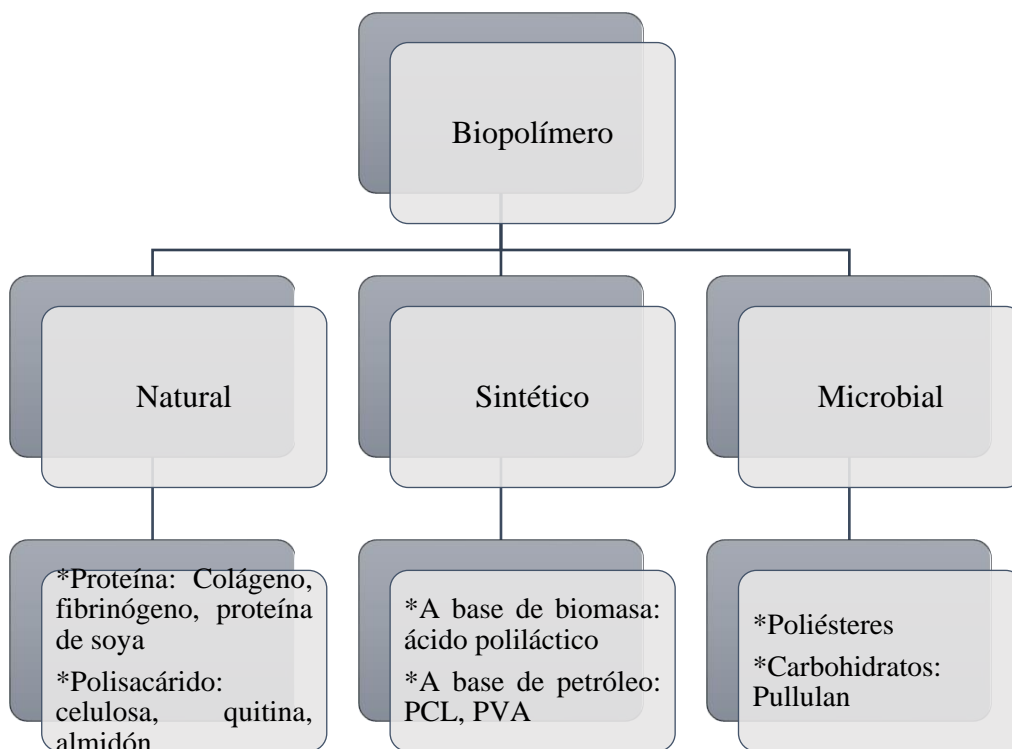
### **1.1. Biopolímeros**

Los biopolímeros provienen de recursos naturales renovables y comúnmente biodegradables (Rivera-Corona et al., 2014). Son polímeros naturales que a menudo tienen estructuras de carbohidratos poliméricos y presentan una alta estabilidad bajo diferentes condiciones (Chen et al., 2019).

Los polímeros naturales son biomateriales compuestos y comúnmente se obtienen de fuentes vegetales, animales y microbianas. El potencial de los polímeros naturales, especialmente los biopolímeros de plantas, ha aumentado significativamente, como lo confirma la enorme cantidad de documentos asociados y patentes recientemente publicadas. Los biopolímeros de origen vegetal, o sus modificaciones, son ampliamente utilizados en aplicaciones farmacéuticas, alimentarias y biomédicas. La mayoría de ellos son seguros para el consumo oral y se prefieren sobre sus contrapartes sintéticas debido a su bajo costo, no toxicidad y disponibilidad abundante (Ghori et al., 2017).

Desde la antigüedad, los polímeros naturales han sido ampliamente utilizados como recursos medicinales, funcionales y alimentarios debido a su actividad biológica diversa. Los biopolímeros tienen diferentes recursos como el origen vegetal (p. ej., guar y pectina), origen de los árboles (p. ej., exudados de la goma de la familia Rosaceae), origen de las bacterias (p. ej., goma xantana y dextrano) y origen de las algas (p. ej., alginato) (Salarbashi y Tafaghodi, 2018). En los últimos años, el uso de biopolímeros ha aumentado debido a la alta demanda en la industria manufacturera. Esto se relacionó principalmente con el reemplazo de polímeros emitidos por recursos no renovables para minimizar la contaminación ambiental.

Los biopolímeros se pueden clasificar de manera diferente en base a una escala diferente. Según su origen, tres tipos de biopolímeros se pueden distinguir tradicionalmente en biopolímeros naturales, sintéticos y microbianos como se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Clasificación de biopolímeros según su origen (Ibrahim et al., 2019).

Los biopolímeros son objeto de la fabricación de cientos de objetos utilizados en nuestra vida diaria, por consecuencia tienen un gran papel en la industria y la economía. Los biopolímeros son los más utilizados para el envasado, la agricultura, la medicina y muchas áreas más. En la actualidad, se están desarrollando biopolímeros para aplicaciones en diferentes campos, desde aplicaciones simples hasta aplicaciones de alto uso, como la aplicación en medicina. La protección del medio ambiente y la sustitución de polímeros tóxicos fomentan el uso de biopolímeros que se benefician de sus características principales: biocompatibilidad y biodegradabilidad (Ibrahim et al., 2019).

### 1.1.1. Gomas y mucílagos

Las gomas y los mucílagos son polisacáridos o carbohidratos complejos que contienen uno o más monosacáridos o sus derivados unidos en una variedad desconcertante de enlaces y estructuras. Ambos, gomas y mucílagos están estrechamente relacionados con hemicelulosas

en la composición, excepto que los azúcares producidos por hemicelulosas son glucosa, manosa y xilosa, mientras que los producidos por gomas y mucílagos son galactosa y arabinosa. Las gomas y los mucílagos poseen una estructura polimérica ramificada y compleja, por lo que exhiben altas propiedades cohesivas y adhesivas (Prajapati et al., 2013).

Las gomas y los mucílagos están presentes en altas cantidades en variedades de plantas, animales, algas marinas, hongos y otras fuentes microbianas, donde desempeñan una serie de funciones estructurales y metabólicas; las fuentes vegetales proporcionan las mayores cantidades. Varias partes de la planta (por ejemplo, paredes celulares de plantas, exudados de árboles, semillas, tubérculos / raíces, algas) tienen células superficiales que contienen gomas, mucílagos y compuestos de fibra y proteínas. Algunas de las semillas de las plantas tienen células superficiales que contienen gomas, mucílagos, fibra y proteínas. Los exudados de las gomas de las plantas son producidos por varias plantas como resultado de los mecanismos de protección contra lesiones mecánicas o microbianas (Mirhosseini y Amid, 2012). Las diferentes gomas disponibles se clasifican en el cuadro 1 y los diferentes mucílagos disponibles se clasifican en el cuadro 2.

**Cuadro 1.** Clasificación de gomas.

<b>Base</b>	<b>Clase</b>	<b>Ejemplo</b>
<b>Carga</b>	Gomas no iónicas	Goma guar, goma de algarrobo
	Gomas aniónicas	Goma arábica, goma karaya
<b>Forma</b>	Ramificación corta	Goma xantana, goma guar
	Ramificación en ramificación	Goma arábica, goma tragacanto
<b>Origen</b>	Gomas de semillas	Goma guar, goma karaya
	Exudados de plantas	Goma arábica, goma ghatti
	Exudados microbianos	Dextrano, goma gellan
	Algas marinas	Alginato de sodio, ácido algínico
<b>Comportamiento de gelificación</b>	Geles fijados en frío	Goma gellan, goma de linaza
	Geles fijados en calor	Konjac
	Geles re-entrantos	Xiloglucano

<b>Estructura química</b>	Galactomananos	Goma de alholva, goma guar
	Glucomananos	Konjac
	Ácido urónico con gomas	Goma xantana
	Tri-heteroglicanos	Goma gellan
	Tetra-heteroglicanos	Goma arábica, goma de psyllium
Penta-heteroglicanos	Goma ghatti, tragacanto	

(Prajapati et al., 2013)

**Cuadro 2.** Clasificación de mucílagos.

<b>Base</b>	<b>Origen</b>	<b>Parte</b>
<b>Mucílago intracelular</b>	Orquídeas sp.	Cormo
	<i>Agropyron repens</i> L., Beauvois.	Rizoma
	<i>Urginea maritima</i> L., Baker (Squill)	Bulbo
	<i>Allium</i> sp. (cebolla, ajo)	Bulbo
	<i>Viola tricolor</i> L.	Tallo, hoja, flor, estambres
	<i>Hagenia abyssinica</i> , Bruce, Gmelin	Pedúnculo
	<i>Musa paradisiaca</i> Áloe	Pulpa Planta suculenta
<b>Mucílago de la membrana celular</b>	<i>Althaea officinalis</i> L.	Raíz
	<i>Cinnamomum</i> sp.	Corteza
	<i>Rhamnus frangula</i> L.	Corteza
	<i>Sassafras variifolium</i> , Salisbury	Corteza de raíz
	<i>Ulmus fulva</i>	Corteza interior
	<i>Agathosma betulina</i> , Thunberg	Hojas
	<i>Linum usitatissimum</i> L. <i>S. nigra</i> L., <i>Sinapis alba</i> L	Cubierta de la semilla Cubierta de la semilla

	<i>Cydonia vulgaris</i> L.	Cubierta de la semilla
<b>“Secreting hairs”</b>	<i>Viola tricolor</i> L.	Hoja y cáliz
<b>Pelillos</b>	<i>Coffea arabica</i> L.	Hoja
<b>secretantes</b>	<i>Prunus avium</i>	Hoja

(Prajapati et al., 2013)

### 1.1.2. Gomas

La palabra goma se deriva del término egipcio quemi, o kami, que se refiere a la exudación pegajosa de la planta *Acanthus*. Por otra parte, el término goma hace referencia a los hidrocoloides polisacáridos, que no forman parte de la pared celular, sino que son exudados o esbeltos y son productos patológicos que consisten en sales de calcio, potasio y magnesio de sustancias complejas conocidas como "poliurónidos" (Prajapati et al., 2013). Además, se utiliza para describir un grupo de polisacáridos naturales que se encuentran en aplicaciones industriales generalizadas debido a su capacidad para formar geles, hacer soluciones viscosas o estabilizar los sistemas de emulsión.

Cuando se daña la corteza del árbol, la planta exuda una sustancia pegajosa que se endurece con la exposición al aire. Esta sustancia unida al árbol se llama goma. Las gomas son ampliamente utilizadas porque son renovables, seguras, biodegradables y no tóxicas. Las gomas más conocidas son Acacia Arabica, Acacia Catechu, Mangostán, Karaya, Ghati, Guar, Tragacanto y algunas otras gomas no identificadas (Ibrahim et al., 2019).

Actualmente, para propósitos prácticos las gomas se han dividido en dos tipos, las solubles y las insolubles en agua. Las primeras todavía se conocen como gomas, pero gradualmente han sido reemplazadas por una designación más científica como coloides hidrofílicos, o preferiblemente hidrocoloides. Las segundas se refieren al chicle, la rosina, el látex de caucho, entre otros, y se conocen en sentido general como «resinas». Los hidrocoloides se pueden agrupar en tres categorías principales como se muestra en el cuadro 3.

**Cuadro 3.** Clasificación de los hidrocoloides.

<b>Clasificación</b>	<b>Compuestos</b>
<b>Hidrocoloides naturales</b>	Exudados de plantas: Arábica, Tragacanto, Karaya, Ghatti Semillas de plantas: Garrofin, Guar Extractos de algas marinas: Agar, Alginatos, Carragenina Almidones Animal: Gelatina, Albúmina, Caseína Subproducto vegetal: Pectina, Arabinogalactano
<b>Hidrocoloides semisintéticos</b>	Derivados de la celulosa: Carboximetilcelulosa (CMC), Metilcelulosa, Hidroxipropilcelulosa Gomas de fermentación microbiano: Xantan, Gelano Almidones modificados: Carboximetil almidón, Hidroxipropil almidón Modificados químicamente: Alginato de propilenglicol, Pectina metoxilada
<b>Hidrocoloides sintéticos</b>	Polímeros vinílicos: Polivinilalcohol (PVA), Polivinilpirolidina (PVP) Polímeros de óxido de etileno: Polyox

(Rodríguez y Sandoval, 2003)

Los hidrocoloides son polímeros de cadena larga y alto peso molecular, que se disuelven en agua proporcionando un efecto espesante. Todos ellos imparten viscosidad a los sistemas acuosos; sin embargo, solo algunos son capaces de formar gel bajo ciertas condiciones de proceso (Rodríguez y Sandoval, 2003). Los hidrocoloides se usan para diversas aplicaciones como fibra dietética, modificadores de textura, agentes gelificantes, espesantes, estabilizadores y emulsionantes, agentes de recubrimiento y películas de embalaje (Mirhosseini y Amid, 2012). Además, los hidrocoloides tienen aplicaciones en las áreas de películas comestibles, sabores encapsulantes e inhibición de la cristalización.

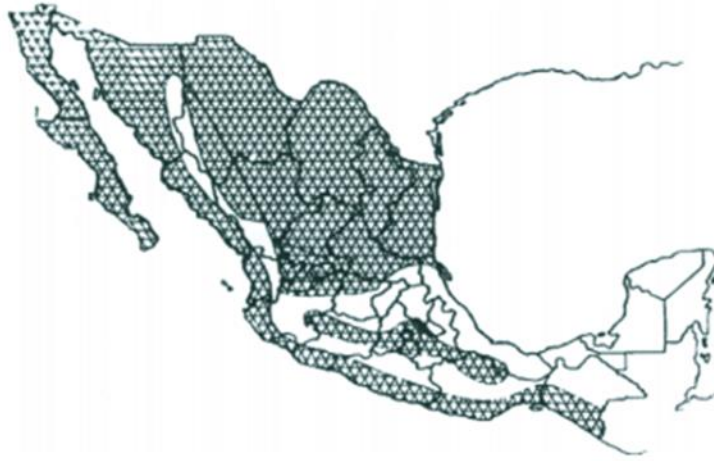


Aunque los hidrocoloides son abundantes en la naturaleza como componentes funcionales de tejidos vegetales y animales, solo un número limitado es adecuado para la explotación comercial. El desarrollo de hidrocoloides aplicables de cultivos y disposición de alimentos permite la recuperación, el reciclaje y la sostenibilidad de ingredientes de alto valor agregado en la cadena alimentaria, enfocando el interés en las propiedades físicas y funcionales de los exudados de goma vegetal y los mucílagos de semillas de varias fuentes (Alpizar-Reyes et al., 2017).

#### **1.1.2.1. Goma de mezquite**

El árbol de mezquite es originario de México; existen 44 especies, de las cuales 42 se encuentran en el continente americano en dos grandes ubicaciones, la norteamericana (México-Texas) y la sudamericana (Argentina-Paraguay-Chile), aunque el árbol *Prosopis* se ha introducido en las zonas áridas de la India oriental, Australia, África y principalmente Hawai. El árbol de mezquite (*Prosopis* spp.), es nativo de zonas áridas y semiáridas del mundo, adaptable a condiciones de extrema aridez y altura sobre nivel del mar. El mezquite es un árbol de 4-12 m de altura que pertenece a la familia *Leguminosae*, subfamilia *Mimosoideae* y género *Prosopis*.

México posee una extensión de 56 y 23 millones de km<sup>2</sup> de zonas áridas y semiáridas, respectivamente, que representan ~40% de la superficie total del territorio mexicano. El área ocupada por los árboles de mezquite en México se estima en 3,550,500 hectáreas, principalmente en las zonas áridas y semiáridas (Fig. 2). (Vernon-Carter et al., 2000). En estas zonas se ha considerado que el cultivo del mezquite representa una alternativa de desarrollo agropecuario forestal que podría mejorar los niveles de vida del sector rural.



**Figura 2.** Distribución de árboles de mezquite (*Prosopis* spp.) en México. Las partes sombreadas en el mapa indican las zonas áridas y semiáridas donde crece.

En la actualidad se le considera con potencial como forraje, material de construcción y combustible; sus comunidades proporcionan sitios para recreación humana, refugio de fauna silvestre, fuente de néctar para abejas y otros insectos, es importante también en la retención del suelo, ya que previene el proceso de desertificación. En la producción forestal de la madera es fuerte y durable, buena para la fabricación de muebles, puertas, ventanas, pisos, objetos decorativos, artesanías y excelente como leña y carbón (Rodríguez et al., 2014).

Este tipo de árbol produce una goma viscosa en las cavidades de su xilema y floema, que usualmente fluye a través de la corteza donde se endurece en lágrimas, nódulos u otras formas de color ámbar. Se ha observado que los eventos de alta temperatura y estrés hídrico aumentan la producción de goma (López-Franco et al., 2012). Se ha utilizado ampliamente en México y en el suroeste de los Estados Unidos en pequeñas industrias de procesamiento, principalmente en productos alimenticios y confitería (Vernon-Carter et al., 2000).

La goma de mezquite es un heteropolioelectrolito complejo altamente ramificado, formado principalmente por L-arabinosa y D-galactosa, y en menores proporciones de 4-O-metil-D-glucuronato, y L-ramnosa, con relación de 2: 4: 1: 1. Varios estudios han establecido que la goma de mezquite, el exudado de *Prosopis laevigata*, posee propiedades emulsionantes y microencapsulantes. Esta goma contiene una pequeña cantidad de proteínas (2.0-4.8%), esta

fracción proteica es responsable de las propiedades emulsionantes y formación de película. La goma de mezquite se ha clasificado como un AGP de tipo II de alto peso molecular que es ligeramente ácido, heterogéneo y polidisperso (Rodea-González et al., 2012).

Entre sus propiedades fisicoquímicas se encuentra que la goma de mezquite es altamente soluble en agua, forma estructuras globulares compactas, lo cual en solución le proporciona la capacidad de reducir la tensión superficial de las soluciones acuosas, actuando como un estabilizador y emulsionante sin un aumento significativo de la viscosidad (López-Franco et al., 2012). La goma de mezquite es insoluble en aceites y en la mayoría de los disolventes orgánicos. Es soluble en etanol acuoso hasta un límite de aproximadamente 70% de etanol. Tiene una solubilidad limitada en glicerol y etilenglicol (Vernon-Carter et al., 2000). Se puede considerar como una alternativa de polímero de encapsulación económico que podría atrapar el aceite de cáscara de naranja con una alta eficiencia. La goma de mezquite se puede utilizar en la preparación de emulsiones de aceite en agua, en un amplio intervalo de valores de pH (Gharsallaoui et al., 2007).

En los estados mexicanos de Sonora y San Luis Potosí se han llevado a cabo estudios cuantitativos para estimar la disponibilidad de goma de mezquite en los bosques de mezquital, es decir, en poblaciones silvestres. Sonora, en el noroeste de México, tiene una extensión de 184,934 km<sup>2</sup>, con el 70% de superficie desértica y semidesértica. Sin embargo, las masas arboladas de mezquite como especie dominante, y con potencial de aprovechamiento, se encuentran en bajíos y áreas ribereñas principalmente. En el caso de goma de *P. laevigata* también se han llevado a cabo estudios de este tipo en un bosque de San Luis Potosí que abarca 600 km<sup>2</sup>, de estos estudios se concluye que la producción potencial de goma de *P. laevigata* en un área de 600 km<sup>2</sup> es de 2,061 ton/año. Esta producción podría satisfacer la demanda de goma arábica en México, dejando un excedente considerable para exportación (López-Franco et al., 2006).

### **1.1.3. Mucílagos**

El mucílago, naturalmente, es una molécula de carbohidrato polimérico complejo, pertenece al grupo de los hidrocoloides con una estructura altamente ramificada. Por lo general, consisten en diferentes magnitudes de L-ramnosa, L-arabinosa, D-galactosa y D-xilosa, y también varias proporciones de ácido galacturónico. En general, la estructura del mucílago está formada por dos fracciones individuales solubles en agua, incluida la pectina con atributos de gelificación con  $\text{Ca}^{2+}$  y un componente de mucílago sin características de gelificación. Los mucílagos por formación de suspensiones coloidales y de alta viscosidad se pueden usar para espesar, gelificar, formar películas y estabilizar la formulación de muchos productos alimenticios como jarabes, salsas, alimentos instantáneos, helados, bebidas y productos de confitería (Golalikhani et al., 2014).

El mucílago es un polisacárido que se convierte en una masa viscosa mediante la adición de agua a algunas semillas u otras partes de la planta (Basiri et al., 2018). Se consideran productos normales del metabolismo, producidos dentro de las células de las plantas (formación intracelular) (Salarbashi y Tafaghodi, 2018). Además, cuentan con una amplia gama de propiedades fisicoquímicas que pueden explotarse para diversas aplicaciones en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica (Conteras-Padilla et al., 2016).

Los mucílagos pueden estar compuestos por muchas unidades poliméricas diferentes y, por lo tanto, es probable que muestren múltiples funcionalidades (Manhivi et al., 2018). El mucílago tiene una alta capacidad de absorción de agua, lo que proporciona una fuente potencial de hidrocoloides alimentarios industriales como aglutinantes y agentes espesantes en los alimentos (Peters et al., 2015).

#### **1.1.3.1. Mucílago de nopal**

*Opuntia ficus indica* es una planta ampliamente distribuida en países semisecos como México, Marruecos, Túnez, Eritrea, Etiopía, Argentina, Perú, Bolivia, Brasil, Estados Unidos, España, Italia, Israel, Irán y Sudáfrica. Esta planta pertenece a la familia *Cactaceae* (un gran género de arbustos suculentos con más de 360 especies), y también es conocida como planta de pera de cactus o nopal, y tiene una gran capacidad de adaptación a diferentes

condiciones ambientales, por lo tanto, se puede plantar en varios sistemas ecológicos. En los últimos años, varias partes de la planta como la raíz, el tallo, la fruta y la flor se han utilizado para preparar bebidas y postres. Por ejemplo, en México, los frutos de esta planta se comen como fruta fresca o enlatada (Salehi et al., 2019). La familia *Cactaceae* se usa para la dieta humana en varios países, debido a sus beneficios altamente nutritivos. Además, los compuestos obtenidos de los frutos y cladodios de estas plantas contienen una gran cantidad de ingredientes, en particular fibras y antioxidantes, entre ellos, ácido ascórbico, tocoferoles, carotenoides, ácidos fenólicos y polisacáridos. En general, la planta de cactus podría servir como fuente de frutas y verduras, medicinales y cosméticas, forrajes y colores naturales en tierras áridas y semiáridas desfavorables para otros cultivos (Peters et al., 2015).

Los cladodios son tallos modificados y reemplazan las hojas en su función fotosintética. Son órganos suculentos y articulados con forma ovoide o alargada (30–80 cm de largo y 18–25 cm de ancho). La parte interna de los cladodios está formada por la clorénquima, donde se realiza la fotosíntesis, y la parte interior está formada por un parénquima medular blanco cuya función principal es el almacenamiento de agua. Hay células mucilaginosas en ambos, que almacenan el mucílago. Los cladodios son de poca utilidad para el consumo humano, excepto los tallos tiernos (nopalitos) que se consumen como verduras en algunos países como México.

La *Opuntia ficus indica* es una familia de plantas que tiene diversos usos, un componente interesante de estas plantas es el mucílago. El mucílago es un carbohidrato complejo, parte de la fibra dietética. Por esta y otras razones, es un componente con excelentes perspectivas como aditivo, no solo para la industria alimentaria, sino también para otros usos industriales (Sáenz et al., 2004), además tiene una alta capacidad de absorción de agua, lo que le brinda excelentes perspectivas de uso como hidrocoloide en alimentos procesados (Martin et al., 2017).

El mucílago *Opuntia ficus-indica* es una mezcla de polisacáridos ácidos y neutros que consiste principalmente de 24.6–42% de arabinosa; 21–40.1% de galactosa; 8–12.7% de ácido galacturónico; 7 a 13.1% de ramnosa y 22 a 22.2% de xilosa. El principal constituyente de esta sustancia es un heteropolisacárido con un peso molecular de  $2.3 \times 10^4$  a  $3 \times 10^6$  g/mol

(León-Martínez et al., 2010). Por otra parte, Rivera-Corona et al., (2014) determinó la composición química del mucílago de nopal: humedad  $3.23 \pm 0.39$  (g/ 100g), proteína  $6.34 \pm 0.14$  (g/ 100g), ceniza  $23.19 \pm 0.69$  (g/ 100g), lípidos  $0.59 \pm 0.002$  (g/ 100g), carbohidratos (por diferencia)  $66.65 \pm 0.61$ (g/ 100g). El mucílago tiene un valor ligeramente ácido de pH entre 5.5 – 6.

Vargas-Rodríguez et al. (2018) muestran el comportamiento de solubilidad del mucílago *opuntia ficus indica* con diferentes disolventes, ácidos y bases a distintas temperaturas, los cuales se muestran en el cuadro 4. Es muy importante tomar en cuenta estos resultados ya que pueden servir para la elección de un solvente o aditivo en la elaboración de un biopolímero a base de mucílago.

**Cuadro 4.** Solubilidad del mucílago del *Opuntia Ficus Indica* en algunos solventes, ácido y bases a temperaturas de 25 °C, 40 °C y 60 °C.

	<b>25°C</b>	<b>40°C</b>	<b>60°C</b>
<b>Agua</b>	Gran solubilidad	Mediana solubilidad	No es soluble
<b>Acetona</b>	No es soluble	No es soluble	No es soluble
<b>Alcohol etílico</b>	No es soluble	No es soluble	No es soluble
<b>Ácido clorhídrico (0.1 M)</b>	Mediana solubilidad	Solubilidad mayor	Mejor solubilidad
<b>Hidróxido de sodio (0.1 M)</b>	Poco soluble	Poco soluble	Mejor solubilidad
<b>Acetonitrilo</b>	No es soluble	No es soluble	No es soluble

(Vargas-Rodríguez et al., 2018)

Debido a sus propiedades emulsionantes y de retención de agua, además de su comportamiento reológico, es una opción interesante para su utilización como portador de sustancias activas. El mucílago es un hidrocoloide que se ha reportado como un compuesto con buenas propiedades en términos de formación de recubrimientos comestibles. Es un aditivo con un alto potencial para su uso en la preparación de nanocubrimientos (Zambrano-

Zaragoza et al., 2014), y se ha encontrado que extiende la vida útil sin afectar el brillo, la textura, el aspecto general y las propiedades sensoriales de los alimentos.

Algunas de las aplicaciones estudiadas son: como inhibidor de la corrosión del aluminio, como agente purificador del agua, como adhesivo orgánico de la cal para restaurar y proteger edificios históricos en México, en la industria alimentaria, estas macromoléculas se utilizan como recubrimiento comestible en frutas, como estabilizador de emulsiones y espuma, para controlar la cristalización, como estabilizador de suspensión, para inhibir la sinéresis y para formar geles. El análisis de difracción de rayos X muestra la presencia de carbonato de calcio en dos formas cristalinas diferentes, la importancia de este hallazgo radica en que el calcio de estos compuestos es biodisponible para el cuerpo humano. Este hecho podría llevar a nuevas e importantes aplicaciones de mucílago de nopal en la industria alimentaria (Conteras-Padilla et al., 2016). El alto contenido de humedad en el mucílago limita sus aplicaciones, lo que genera la necesidad de tratamientos previos como el secado por pulverización para aumentar sus usos potenciales (Medina et al., 2013).

#### **1.1.4. Importancia de gomas y mucílagos**

Las gomas y los mucílagos son los ingredientes vegetales más comúnmente disponibles con una amplia gama de aplicaciones en las industrias farmacéutica y cosmética, se están utilizando debido a su abundancia en la naturaleza, la seguridad y la economía. Además, son biocompatibles, baratos y de fácil acceso. Más aún los materiales naturales tienen ventajas sobre los sintéticos, ya que son químicamente inertes, no tóxicos, menos costosos, biodegradables y ampliamente disponibles (Prajapati et al., 2013).

En cuanto a las ventajas como biopolímeros podemos mencionar (Ibrahim et al., 2019):

1. Los biopolímeros aumentan el contenido orgánico del suelo, así como la retención de agua y nutrientes, al tiempo que reducen los aportes químicos y suprimen las enfermedades de las plantas.
2. La energía necesaria para sintetizar y fabricar la mayoría de los biopolímeros es generalmente mucho menor.

3. Los biopolímeros ofrecen beneficios ambientales al utilizar recursos energéticos renovables y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

La utilización de los mucílagos y gomas depende de sus propiedades funcionales únicas, como la viscosidad, las propiedades emulsionantes y espumantes, la gelificación, así como su papel bioactivo en la prevención y / o tratamiento de ciertas enfermedades (Kaewmanee et al., 2014.). Su importancia se fundamenta principalmente en las propiedades funcionales de estabilización, espesamiento y gelificación. Estas propiedades son originadas principalmente por las interacciones de los polisacáridos con el agua, actuando de dos formas distintas: como espesantes por la retención de agua o como gelificantes por la construcción de una red tridimensional macroscópica de cadenas interconectadas, dentro de la cual se liga un sistema acuoso (Rodríguez y Sandoval, 2003).

El mucílago y las gomas son conocidos como fuentes ricas en polisacáridos desde la antigüedad. Son ampliamente utilizados en la industria farmacéutica y alimentaria como espesantes, agentes de retención de agua y estabilizadores de emulsión, agentes de suspensión, aglutinantes, etc. Además de su papel en los medicamentos terminados, se han encontrado nuevos usos en la preparación de la industria de cosméticos, textiles y papel (Archana et al., 2013).

#### **1.1.5. Mezclas de biopolímeros**

El objetivo de mezclar biopolímeros con diversas estructuras físicas y químicas, compatibles parcialmente o totalmente incompatibles, en proporciones adecuadas, en general se debe a la búsqueda de la optimización de las propiedades de los componentes, para dar un producto final que tenga mejor funcionalidad o costo menor que los de los componentes individuales, o, en algunos casos, para producir nuevos materiales para fines específicos.

Cuando se mezclan dos biopolímeros, es inusual que cada uno se comporte exactamente de la misma manera que lo haría en ausencia del otro polímero (Morris, 2009). Así mismo es importante tener en cuenta que el tipo de interacciones entre biopolímeros depende de sus estructuras y de sus características moleculares (peso molecular, hidrofobicidad, carga eléctrica y flexibilidad), así como de sus concentraciones (Li et al., 2012). Los resultados



pueden mejorar si se emplean mezclas de distintos biopolímeros debido a la posible existencia de efectos sinérgicos.

Se citan ejemplos de estudios realizados utilizando mezclas de biopolímeros y su efecto encontrado, y así poder observar los beneficios de las mezclas, proporcionando materiales con mejores propiedades.

**Cuadro 5.** Ejemplos de mezclas de biopolímeros y sus efectos encontrados.

<b>Mezcla de biopolímeros</b>	<b>Efecto encontrado</b>	<b>Referencia</b>
<b>Goma de linaza – Gel de caseína</b>	Se estudió el efecto de la adición de goma de linaza en las propiedades reológicas de los geles mixtos de linaza-caseína (concentración de goma de linaza: 0.1-0.5%, w/w y concentración de caseína: 15-23%, w/w) con ambos osciladores de pequeña amplitud y medidas de corte constantes. Se encontró que los módulos de almacenamiento ( $G'$ ) y de pérdida ( $G''$ ) aumentaron con el incremento de la concentración de la goma de linaza. También que la temperatura de gelificación aumentaba linealmente con el incremento en la concentración de goma de linaza. Las viscosidades aparentes aumentaron con el aumento de las concentraciones de goma de linaza y caseína.	Li et al., 2012
<b>Emulsiones de aceite esencial de chía en agua utilizando</b>	Se prepararon ocho variaciones de emulsiones frescas de aceite esencial en agua de chía utilizando mezclas de	Rodea-González et al., 2012

<p><b>mezclas de biopolímeros: Concentrado de proteína de suero – Goma arábica/Goma de mezquite</b></p>	<p>biopolímeros de concentrado de proteína de suero con goma de mezquite o goma arábica, relaciones de material del núcleo a la pared (<math>C_0:W_a</math>) de 1:2 y 1:3, y contenido total de sólidos de 30 y 40% en peso. Ambas mezclas de biopolímeros binarios formaron emulsiones estables frescas y reconstituidas contra la coalescencia de gotas.</p> <p>Todas las variaciones de emulsiones mostraron tamaños medio ponderado por volumen (<math>d_{4,3}</math>) de tamaño de gota que cayeron entre 2.32 y 3.35 <math>\mu\text{m}</math> y tasas de coalescencia de gotas (<math>k_c</math>) de <math>10^{-8}\text{s}^{-1}</math>. Las variaciones de emulsiones se secaron por pulverización y las microcápsulas resultantes tenían <math>d_{4,3}</math> cayendo dentro del rango de 13.17–28.20 <math>\mu\text{m}</math>. La eficiencia de encapsulación (EE) fue superior al 70% para todas las microcápsulas, pero las obtenidas de emulsiones con contenido de sólidos totales (TSC) más bajo y relaciones de material del núcleo a la pared (<math>C_0:W_a</math>) más alto mostraron una eficiencia de encapsulación más alta y una superficie de aceite más baja, independientemente del tamaño de partícula de la microcápsula.</p>	
<p><b>Almidón de sorgo – Mucílago de cactus (<i>Opuntia ficus indica</i>)</b></p>	<p>Se evaluaron las propiedades fisicoquímicas, incluida la reología del almidón de sorgo (<i>Sorghum saccharatum</i>), con adición de mucílago de cactus indica</p>	<p>Rivera-Corona et al., 2014</p>

	<p>(<i>Opuntia ficus</i>). Se prepararon mezclas de almidón y mucílago con las proporciones 90:10 y 95:5 (g:g). Un aumento significativo en la temperatura de gelatinización del almidón y la entalpía fue observado con la adición del mucílago. La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier y la difracción de rayos X revelaron interacciones físicas entre el almidón y el mucílago, posiblemente por enlaces de hidrógeno, que podrían restringir la movilidad del agua a través de las regiones amorfas de los gránulos, favoreciendo el aumento de la temperatura de entalpía y de gelatinización. Las mezclas de almidón-mucílago, presentaron un incremento de un grado de estado amorfo desordenado en geles de almidón. Los espectros mecánicos de los geles de almidón aumentaron aproximadamente tres veces el módulo de almacenamiento (<math>G'</math>) y el doble que el módulo de pérdida (<math>G''</math>), en muestras con 90:10 (g:g) mezcla de almidón-mucílago, lo que sugiere una reorganización en la estructura del sistema almidón-mucílago.</p>	
<p><b>Goma xantana – Goma guar</b></p>	<p>La aplicabilidad potencial de varios biopolímeros para mantener las partículas sólidas de una lechada de partículas en suspensión se evaluó mediante pruebas de sangrado estático (static bleeding tests). Se</p>	<p>Khatami y O'Kelly, 2018</p>

	<p>utilizaron varios biopolímeros, pero los que mostraron mejores resultados fue la mezcla de goma xantana-goma guar. La mezcla de estos biopolímeros aumentó el potencial zeta de las partículas de GGBS (granulated blast-furnace slag) limpias, lo que indica que estos dos biopolímeros son totalmente compatibles entre sí y forman una mezcla sinérgica. Esta excelente propiedad sinérgica le permite preparar una lechada de partículas bien suspendidas a una concentración de biopolímero más baja y tener menor viscosidad utilizando un biopolímero (en este caso, goma guar) que por sí solo tiene una alta susceptibilidad a la separación del agua del volumen total de una lechada o pasta en partículas (bleeding)</p>	
<p><b>Mucílago de semilla de lino – Carboximetilcelulosa</b></p>	<p>Se investigó el efecto del mucílago de semilla de lino y su combinación con carboximetilcelulosa sobre las propiedades de calidad del yogur batido. La adición de la mezcla mucílago de semilla de lino – carboximetilcelulosa al yogurt batido produce una disminución de la adherencia, mayor cohesión y elasticidad. Aumenta significativamente la viscosidad y disminuye la sinéresis. Decrementa el defecto de gomosidad (defecto en el que se percibe un sentimiento pegajoso-viscoso en la boca) en el yogurt. Teniendo en cuenta las propiedades beneficiosas del mucílago</p>	<p>Basiri et al., 2018</p>

	de semilla de lino, parece que su uso en yogur no solo mejora las propiedades fisicoquímicas del producto, sino que también aumenta sus beneficios para la salud.	
<b>Almidón de trigo – Mucílago de <i>Basella alba</i></b>	Se encontró que, al agregar mucílago a la solución de almidón de trigo, se producía la gelificación. El aumento significativo tanto en la viscosidad y el límite elástico, particularmente en la proporción de almidón de trigo / mucílago de 1.8 a 0.2, implicó un aumento pronunciado de la interacción de macromoléculas y el desarrollo de entrelazamientos entre el mucílago de <i>Basella alba</i> y las moléculas de almidón lixiviadas (muy probablemente la amilosa) para solidificación. Se obtuvo un aumento significativo en la viscosidad y el módulo de almacenamiento, acompañado con una disminución de la pérdida tangente a menos de 1.	Hung y Lai, 2019

## 1.2. Características fisicoquímicas de los biopolímeros

La funcionalidad de los biopolímeros de recursos vegetales depende de sus propiedades fisicoquímicas (Ghori et al., 2017), así mismo los biopolímeros son macromoléculas naturales cuyas propiedades físicas y químicas dependen de sus propiedades estructurales y de sus funciones metabólicas.

Las propiedades fisicoquímicas (por ejemplo, morfología, forma, tamaño, carga) de los complejos de biopolímeros mixtos están muy influenciadas por los parámetros intrínsecos y extrínsecos (Zeeb et al., 2018).

### **1.2.1. Solubilidad en agua**

La solubilidad es un parámetro físico que nos permite establecer cuantitativamente, la capacidad de la biopelícula de disolverse en agua, es la medida de la capacidad que tiene una determinada sustancia de disolverse en otra, expresada como el porcentaje de disolución de la primera sustancia en la segunda. La solubilidad depende del tipo de solvente y de los grupos funcionales presentes. Se considera un criterio importante para las diversas aplicaciones de los biopolímeros en las industrias alimentarias y farmacéuticas. Desde un punto de vista funcional, la solubilidad completa de los biopolímeros es favorable porque conduce a lograr las propiedades funcionales máximas (Keshani-Dokht et al., 2018). Sin embargo, la propiedad de solubilidad podría no ser necesariamente la propiedad dominante para los complejos compuestos de biopolímeros (Zeeb et al., 2018).

La solubilidad es un factor crucial ya que la máxima funcionalidad de cualquier hidrocóide se logra después de su disolución total en agua. La solubilidad en agua está relacionada con la fuerza de las interacciones entre el polisacárido y el agua a través de enlaces de hidrógeno conducidos por medio de grupos hidrófilos a lo largo de la cadena del polímero (Dick et al., 2018). También es fundamental en el análisis en los sistemas alimentarios porque afecta a otras propiedades funcionales y sirve como un indicador útil del rendimiento de los hidrocóides en los sistemas de dispersión. La interacción de los hidrocóides con las moléculas de agua reduce la difusión y estabiliza la presencia de hidrocóides en el agua (Alpizar-Reyes et al., 2017). Algunos biopolímeros, principalmente proteínas y polisacáridos solubles en agua, han encontrado múltiples aplicaciones como agentes estabilizantes y texturizantes en un amplio rango de productos alimenticios. El uso funcional de estos hidrocóides está relacionado con su capacidad de incrementar la viscosidad de sistemas acuosos, a sus propiedades para formar geles, así como a su capacidad para estabilizar partículas coloidales diversas (1-100mm) a las que dispersan o emulsionan (López-Franco et al., 2006).

La solubilidad es un área importante para la investigación debido a su impacto en aplicaciones en la industria, como la biotecnología, las ciencias de la alimentación y el suministro de medicamentos. Además, dentro de diversas aplicaciones de salud (por ejemplo, la administración de fármacos y la ingeniería de tejidos) y de la ciencia de los alimentos, es de vital importancia entender el comportamiento de la solubilidad del polímero (Ghori et al., 2017).

### **1.2.2. Capacidad de retención de agua y aceite**

La capacidad de retención de agua es la capacidad de un biopolímero de mantener su agua propia y añadida durante diferentes procesos, la del aceite se atribuye principalmente al atrapamiento físico del aceite (Dehnad et al., 2016). Así mismo, la capacidad de retención de agua es la capacidad de la muestra para retener el agua en condiciones de agua limitadas y se sabe que modifica la textura y la viscosidad de los productos alimenticios facilitando o dificultando su procesamiento (Kalegowda et al., 2017), expresa la máxima cantidad de agua, que puede ser retenida por gramo de material seco en presencia de un exceso de agua bajo la acción de una fuerza patrón. Cabe señalar que las pectinas, mucílagos y algunas hemicelulosas poseen una gran capacidad de retención de agua.

La capacidad de retención de aceite es una de las propiedades funcionales más notables de un hidrocoloide que representa la capacidad de absorción de aceite, se define como la absorción de aceite a través de los sitios no polares laterales dentro de las moléculas de proteínas (Alpizar-Reyes et al., 2017). Es sabido que las partículas con gran superficie presentan mayor capacidad para absorber y atrapar componentes de naturaleza aceitosa, la grasa es atrapada en la superficie de la fibra principalmente por medios mecánicos. La retención elevada de aceite imparte jugosidad y mejora la textura de los productos cárnicos, en cambio una baja retención proporciona una sensación no grasosa en productos fritos.

Desde el punto de vista fisiológico y tecnológico, la capacidad de retención de agua es una de las propiedades más importantes de las gomas de polisacárido que afecta su rendimiento, atributo sensorial, estabilidad física y textura. La capacidad de retención de aceite depende de las propiedades de la superficie de la fibra, el espesor y la química, y la estructura de los

hidrocoloides (la relación y la posición de los grupos hidrófobos a hidrófilos presentes en la estructura de la goma) (Keshani-Dokht et al., 2018).

El enlace y la movilidad de las moléculas de agua son cuestiones relevantes en la tecnología alimentaria desde el punto de vista del rendimiento, la evaluación sensorial, la estabilidad (en términos físicos) y la textura. La capacidad de retención de agua es una propiedad importante de la fibra dietética, de hecho, uno de los principales efectos de la fibra dietética es aumentar la producción de heces que está relacionada con una alta capacidad de retención de agua (Amid y Mirhosseini, 2012), ya que está influenciada por la naturaleza de la matriz fibrosa y por la forma en cómo se encuentra ligada a las moléculas de agua. Es importante por su grado de asociación con efectos saciantes, el aumento del tamaño del bolo alimenticio, el peristaltismo intestinal y los incrementos del volumen y el peso de las heces, además de su efecto laxante.

### **1.3. Propiedades funcionales de los biopolímeros**

Las propiedades funcionales de las gomas o hidrocoloides son las que determinan su aplicación específica en la industria. Los criterios empleados para estudiar las propiedades funcionales son su habilidad para encapsular aromas, sabores, pesticidas, fármacos (propiedades encapsulantes); su capacidad para enlazar moléculas de agua y grasa (propiedades emulsificantes); su efecto sobre la reología y su textura; capacidad para formar geles y efectos sobre la cristalización. (López-Franco et al., 2006)

Las características funcionales y la aplicación potencial de polímeros naturales dependen considerablemente de sus propiedades estructurales y fisicoquímicas. Las propiedades funcionales y las bioactividades de los polímeros naturales pueden variar considerablemente con su peso molecular, composición química, secuencia de monosacáridos, conformación, configuración, posición del enlace glucósido y tamaño de partícula (Salarbashi y Tafaghodi, 2018).

Debido al número limitado de sustancias legalmente permitidas en los alimentos y al hecho de que la aprobación de nuevos ingredientes es costosa y requiere mucho tiempo, se ha puesto cada vez más énfasis en la creación de nuevos atributos funcionales en los coloides



alimentarios mediante el control de las interacciones y la organización estructural de ingredientes existentes. (Li et al., 2020). También los nuevos conocimientos a nivel molecular en la química, así como en las propiedades funcionales de los polisacáridos, han permitido una mejor selección del biopolímero apropiado de acuerdo con las necesidades específicas de la industria. Aunque más de un polisacárido puede satisfacer las propiedades funcionales requeridas de un producto dado, la formulación de aspectos económicos y las propiedades funcionales mejoradas y / o nuevas influirán en la decisión final (Medina Torres et al., 2000).

Una propiedad funcional es cualquier propiedad fisicoquímica de los biopolímeros que afecta y modifica las características de los alimentos contribuyendo a su calidad final, por lo tanto, las propiedades funcionales de los biopolímeros alimentarios permiten fabricar productos de calidad deseable. Por ejemplo, los polisacáridos son buenos agentes espesantes y gelificantes en diferentes rangos de acidez y concentración de varios iones. Algunos almidones son resistentes a la retrogradación, lo que retrasa el endurecimiento del pan. La fructosa retarda la pérdida de humedad de las galletas. Mono y diacilglicerolos, fosfolípidos y proteínas se utilizan para emulsionar lípidos y estabilizar emulsiones y espumas de alimentos. La formación de hielo desfavorable en varios productos podría disminuir por las proteínas anticongelantes, la creación de una textura distintiva del pan de trigo es una de las responsabilidades del gluten, y la estructura de espuma de la crema batida o algunas fases esenciales en las emulsiones de los alimentos están controladas por los lípidos (Dehnad et al., 2016). También el uso de biopolímeros y extractos naturales, gracias a sus propiedades funcionales es actualmente una de las opciones más prometedoras para el desarrollo de materiales para aplicaciones biomédicas.

### **1.3.1. Capacidad emulsionante**

La emulsión es un sistema de dos fases que consta de dos líquidos parcialmente miscibles, uno de los cuales es dispersado en el otro en forma de glóbulos. Las emulsiones de aceite en agua (O / W) son sistemas heterogéneos compuestos de una mezcla de dos fases inmiscibles, una continua y una dispersa, como micro- o nanogotas. Desde un punto de vista

fisicoquímico, las emulsiones son una dispersión coloidal liofóbica y debido a su alta área interfacial son termodinámicamente inestables (Quinzio et al., 2018).

Las emulsiones alimentarias se utilizan como vehículos para agregar sabor a los alimentos, diluir ingredientes y ocultar olores o sabores desagradables. Aunque los alimentos como la yema de huevo, la leche y la crema existen naturalmente como emulsiones, los alimentos preparados, como los aderezos para ensaladas y la margarina, dependen del desarrollo y mantenimiento de una emulsión para su consistencia o estructura (Benhura y Chidewe, 2004). Las emulsiones más comunes utilizadas en los alimentos son aceite en agua (O / W), agua en aceite (W / O) y emulsiones dobles (W / O / W).

La capacidad de un hidrocoloide para formar emulsiones estables es importante para muchas aplicaciones en productos alimenticios, ya que se requiere una capacidad de emulsión y estabilización gradual para obtener las características deseadas en los productos finales. La capacidad emulsionante mide la capacidad de un agente emulsionante para formar emulsiones de agua en aceite, mientras que la estabilidad de la emulsión mide el proceso de ruptura con el tiempo (Alpizar-Reyes et al., 2017).

El concepto de capacidad emulsionante se asocia comúnmente con moléculas tensoactivas que tienen la capacidad de adsorber las gotas finas recién creadas durante la emulsificación, disminuyendo la tensión interfacial para facilitar la ruptura de las gotas, y previniendo las gotas recién formadas contra la re-coalescencia al proporcionar una capa protectora a su alrededor (Dick et al., 2018). Biopolímeros tales como las proteínas son de superficie activa debido a su naturaleza anfifílica (Scianiri et al., 2009).

Factores que afectan la capacidad emulsionante:

- Intrínsecos: pH, temperatura, fuerza iónica, tensoactivos, azúcares, tipo de proteínas, punto de fusión de la fase grasa usada.
- Extrínsecos: Equipo, energía y tiempo, velocidad de cizalla.

El término "emulsión estable" se refiere a la capacidad del sistema para resistir cambios en sus propiedades a lo largo del tiempo. Cuanto mayor sea la estabilidad de una emulsión, mayor será la capacidad de soportar las condiciones del proceso como el bombeo, extracción,

filtración, extrusión, etc. Los estabilizadores se usan comúnmente para proporcionar estabilidad de emulsión a largo plazo. Suelen ser biopolímeros: proteínas o polisacáridos (Quinzio et al., 2018). Estos se han utilizado ampliamente en productos alimenticios para proporcionar viscosidad a la fase continua, modificar los atributos texturales y las propiedades reológicas, estabilizar las emulsiones y suspensiones y mejorar o estandarizar la calidad alimentaria de un producto debido a sus propiedades inodoras, incoloras, insípidas, de bajo valor energético y de digestibilidad. En los productos de emulsión, los polisacáridos como la goma xantana, la goma guar, el almidón modificado, así como la carboximetilcelulosa, son los más utilizados.

Los componentes responsables de la estabilidad de la emulsión se dividen en dos categorías:

- Agentes emulsificantes (emulsionantes): Los emulsionantes son moléculas tensioactivas capaces de estabilizar rápidamente la emulsión. Se adsorben en la interfaz agua-aceite, reducen la tensión interfacial y crean una película protectora.
- Estabilizadores: Los estabilizadores se usan comúnmente para proporcionar estabilidad a la emulsión a largo plazo.

La estabilidad de la emulsión se caracteriza por diversos mecanismos, como el cremado o la sedimentación (causada por la gravedad), la floculación de las gotas, la coalescencia entre las gotas, la maduración de Ostwald y la inversión de fase. La estabilidad de las emulsiones normalmente se extiende mediante el uso de una combinación de varios estabilizadores y emulsionantes. Las emulsiones estabilizadas con proteínas son más estables que las estabilizadas con emulsionantes de bajo peso molecular, ya que las proteínas pueden anclarse simultáneamente en la fase dispersa en varios sitios formando una película gruesa y flexible y evitando la coalescencia de las gotas. Los polisacáridos son excelentes agentes estabilizadores debido a su hidrofilia, estructura altamente ramificada y alto peso molecular que les confieren características espesantes y gelificantes. Forman una barrera macromolecular contra los mecanismos desestabilizadores al aumentar la viscosidad de la fase continua (Gharibzahedi et al., 2013).

Se ha reportado que la capacidad de formación de película, así como las propiedades de emulsión y estabilización de los hidrocoloides, surgen de la fracción proteica (Fathi et al., 2018). La capacidad de la proteína para mejorar la formación y estabilización de las emulsiones es importante para muchas aplicaciones en productos alimenticios como pasteles, blanqueadores de café y postres congelados. En estos productos, se requieren diferentes capacidades de emulsión y estabilización debido a las diferentes composiciones y tensiones a las que están sometidos estos productos (Archana et al., 2013).

Las gomas y los mucílagos pueden actuar como agentes emulsionantes, pueden estabilizar efectivamente la emulsión a través de la absorción interfacial y la posterior formulación de películas condensadas de alta resistencia a la tracción que resisten la coalescencia de las gotas. Estabilizan las emulsiones de aceite / agua formando una película multimolecular fuerte alrededor de cada glóbulo de aceite y, por lo tanto, retardan la coalescencia por la presencia de una barrera hidrófila entre las fases de aceite y agua (Prajapati et al., 2103).

Saénz et al. (2004) comentan sobre un estudio de la capacidad emulsionante del mucílago de nopal, en el cual se encontró que esta goma: (1) redujo las tensiones superficiales e interfaciales; (2) estabilizó emulsiones de aceite-agua; (3) formó pequeñas gotas de aceite; (4) se absorbe en las interfaces de aceite y agua y no contribuye a la viscosidad de los sistemas; (5) los sistemas no floclaron. La goma *Opuntia ficus indica* exhibe fuertes capacidades emulsionantes en emulsiones diluidas de aceite y agua.

Las estructuras moleculares de los biopolímeros (p. ej., pectina, proteína) pueden alterarse, dependiendo de la fuente de la planta y los tratamientos de (pre) procesamiento aplicados, que podrían influir en sus propiedades emulsionantes y / o de estabilización de la emulsión (Santiago et al., 2018). Los biopolímeros con actividad superficial pueden adsorberse en la interfaz aceite / agua durante la homogeneización, permitiendo así que las gotas recién creadas permanezcan estables y eviten la re-coalescencia.

Para diseñar una dispersión basada en emulsión, se utilizan diferentes tensioactivos que tienen sus propios efectos adversos sobre la funcionalidad final de las emulsiones. Los tensioactivos se utilizan para adsorber en la interfaz entre las fases lipídica y acuosa con el fin de reducir la tensión interfacial y estabilizar así las emulsiones. También se ha demostrado que diferentes tensioactivos pueden tener diferentes rendimientos, y a su vez el rendimiento

de diferentes tensioactivos de pequeño peso molecular puede incluso diferir. En términos de estabilidad, además de los parámetros de formulación, los parámetros de procesamiento también podrían influir en la estabilidad final. Se ha demostrado que la formación de las emulsiones depende de la composición de la formulación, la condición de emulsificación y la tensión interfacial entre los fluidos. (Sedagath Doost et al., 2020)

### **1.3.2. Capacidad espumante**

Las espumas están formadas por una fase continua acuosa y una fase dispersa gaseosa (aire). La capacidad espumante es el procedimiento de incorporación de aire para formar una estructura estable (Dehnad et al., 2016). Las espumas son sistemas coloidales termodinámicamente inestables, en los cuales una fase dispersa gaseosa es mantenida en una matriz continua, líquida o semisólida, que contiene un agente con actividad superficial. En la dispersión, las burbujas de gas se encuentran separadas por una fase continua de capas delgadas de líquido (lamelas), que pueden tener espesores del orden de nanómetros. Como consecuencia de la gran área interfacial líquido - gas existente entre las interfaces no miscibles, se requiere energía para producir las espumas y éstas son altamente inestables.

Factores que afectan la propiedad espumante:

- pH,
- Concentración de sales
- Azúcares
- Lípidos
- Concentración proteica
- Tensión interfacial
- Energía libre interfacial

Las espumas alimenticias no se forman espontáneamente. Para producirlas se requiere el aporte de energía mecánica para incrementar el área interfacial alrededor de las burbujas de gas. Debido a la gran cantidad de superficie libre que presentan, las espumas son sistemas termodinámicamente inestables. Sin embargo, desde un punto de vista práctico es posible

producir una espuma cinéticamente estable o metaestable por un cierto periodo de tiempo, que es el que exige el consumidor para cada producto en cuestión. Para ello, se han de incluir en la formulación determinadas sustancias conocidas como ingredientes tensoactivos o agentes espumantes (Dickinson, 1992).

Mientras se agita una solución de superficie activa, el aire se atrapa en el sistema como burbujas. Estas burbujas tienen una tendencia a acercarse y unirse (coalescencia). El resultado serán burbujas más grandes que son termodinámicamente inestables y hacen que el sistema de espuma se colapse. Para evitar la coalescencia de las burbujas de aire, se requiere un agente tensoactivo para crear un gradiente de tensión superficial. Las proteínas se introducen como un agente tensoactivo específico, ya que son capaces de ralentizar el movimiento de las burbujas de aire que se dispersan en la espuma. La mayoría de los polisacáridos tienen la capacidad de prevenir la coalescencia de las burbujas de aire al aumentar el espesor y la viscosidad de las capas que recubren las burbujas de aire (Saeidy et al., 2018). Si bien la capacidad de formar una espuma es muy importante, la posibilidad de mantener esa estructura en el tiempo es una condición crítica para la aplicación de una proteína en una formulación.

El estudio de las espumas (sistemas gas-líquido) ha derivado de un creciente interés tecnológico de la industria alimentaria debido a que dichos sistemas proveen texturas deseables en una gran variedad de productos tradicionales, tales como helados, cremas, merengues, bebidas espumantes, productos de panadería y confitería, etc. (Dickinson, 1992) o de productos nuevos, como alimentos con bajo contenido en grasas e instantáneos, formulaciones con bajo o elevado contenido de alcohol, alimentos funcionales (alimentos infantiles, con valores nutricionales específicos), etc. En las espumas alimentarias más típicas, la estructura está estabilizada por la presencia de proteínas adsorbidas en la interfase aire/ solución; éstas imparten a los alimentos atributos de textura deseables en virtud de la capacidad de atrapar, encapsular y retener el gas que generalmente es aire o dióxido de carbono.

La capacidad espumante (CE) y la estabilidad de la espuma (EE) de los mucílagos dependen de diferentes factores, como el contenido de proteínas y carbohidratos, el peso molecular, la estructura y la presencia de compuestos adicionales en el hidrocoloide. Las buenas propiedades de formación de espuma están relacionadas con una estructura de mucílago flexible que puede reducir la tensión superficial (Alpizar-Reyes et al., 2017).

Sáenz et al. (2004) mencionan un estudio de adición de dispersiones de mucílago de nopal (0.5% y 0.8%) a las espumas de huevo. Las mediciones realizadas cuando se prepararon las dispersiones, y después de 6, 24 y 48 h, mostraron que la adición de mucílago a la espuma, en ambas concentraciones, produjo una mayor estabilidad en las espumas (menos sinéresis y mayor volumen) que el control, hasta 48 h.

Las proteínas y los polisacáridos son dos tipos de biopolímeros muy utilizados como ingredientes funcionales en la formulación de espumas alimenticias, entre otros sistemas dispersos coloidales. Durante y posteriormente a la fabricación, las proteínas junto con los polisacáridos, ejercen una gran influencia contribuyendo a la formación, estabilidad, apariencia, textura y vida útil de las espumas alimenticias (Schorsch et al., 1999). Los hidrocoloides pueden influir de diferentes formas en la estabilidad de emulsiones o espumas. La adsorción de los mismos a la interfase está influida por el carácter hidrofílico / lipofílico, ácido / básico y la presencia de grupos específicos.

La elección de los ingredientes biopoliméricos más apropiados para una aplicación en particular constituye una de las decisiones más importantes en la formulación de espumas alimenticias. Por lo tanto, un buen control de las propiedades funcionales y de las interacciones entre componentes de los alimentos es de gran importancia para el desarrollo de productos y procesos, como así también para lograr nuevas y mejores aplicaciones de estos ingredientes biopoliméricos (Foegeding et al., 2006).

#### **1.4. Sistemas coloidales**

Un coloide es un sistema físico-químico que se encuentra formado por dos fases: las partículas dispersas (fase dispersa) y el medio dispersante (fase continua). Las partículas y el “solvente” forman una mezcla inhomogénea, es decir, en el límite entre lo homogéneo y lo

heterogéneo. Hay distintos tipos de coloides, según el estado físico en el que se encuentren la fase dispersa y el medio dispersante (sol, aerosol, espuma, espuma sólida, emulsión y gel); o según la afinidad entre las dos fases (liofóbicos y liofílicos) (Alcázar-Fabra et al., 2012).

Los sistemas coloidales son sistemas termodinámicamente inestables y tienden a desestabilizarse debido a un exceso de energía libre de superficie, donde la estabilidad no implica tendencia a cambios estructurales (Gharibzahedi et al., 2013). La construcción de vehículos coloidales es un enfoque ampliamente utilizado para mejorar la dispersabilidad, estabilidad y biodisponibilidad de sustancias bioactivas. Como cada sustancia bioactiva y cada producto alimenticio tiene características únicas, es necesario adaptar el diseño de los vehículos coloidales para cada aplicación específica (Li et al., 2020).

#### **1.4.1 Coloides en industria alimentaria**

Dependiendo de la aplicación final, el compuesto activo y la normativa alimentaria, se puede diseñar una gran variedad de dispersiones coloidales (Sedagath Doost et al., 2020).

La ciencia coloidal juega un papel fundamental en muchas áreas de la industria alimentaria moderna, incluida la seguridad, la calidad, el procesamiento, el envasado y la nutrición de los alimentos, porque muchos alimentos contienen polímeros o partículas pequeñas que gobiernan sus propiedades. En los sistemas alimentarios coloidales, algunos de los ingredientes funcionales más importantes son las proteínas, los polisacáridos, los polifenoles y sus complejos. Muchas proteínas y polisacáridos de los alimentos tienen buenas propiedades espesantes, gelificantes, emulsionantes y espumantes. Como resultado, pueden usarse para mejorar la apariencia, textura, estabilidad y sensación en la boca de los alimentos. Sin embargo, la naturaleza y el rango de aplicación de las moléculas alimentarias de origen natural son a menudo bastante limitados y no pueden cumplir con todos los requisitos de los coloides alimentarios comerciales. Por lo tanto, es necesario utilizar métodos ecológicos, seguros y efectivos para modificar estas moléculas de alimentos con el fin de extender su desempeño funcional (Li et al., 2020).



## ***JUSTIFICACIÓN***

## 2. JUSTIFICACIÓN

En la industria alimentaria se está en constante búsqueda de nuevos biopolímeros para su uso como aditivo, con propiedades funcionales que puedan sustituir a los ampliamente usados que tienden a ser importados, de precios fluctuantes y en ocasiones presentan problemas de disponibilidad. Un ejemplo de estos es la goma Arábiga, Sudán es la principal fuente mundial (80%) de este exudado liberado por árboles que tardan al menos 6 años en establecerse, la oferta también es incierta debido a las condiciones climáticas, económicas y políticas en la región, lo que resulta en fluctuaciones de precios. Es por ello que en esta investigación se propone el estudio de las mezclas de dos biopolímeros (goma de mezquite y mucílago de nopal) disponibles en México con la intención de aprovechar al máximo el nopal el cual es un recurso que se utiliza tanto como cultivo alimenticio, como elemento base para productos derivados que son utilizados en la industria alimentaria, farmacológica, cosmética, entre otros, además de ser una planta que se adapta a cualquier clima y a cualquier condición, haciéndolo un cultivo sustentable, con el cual no se tendría problemas de desabasto.

Los nopales son una verdura tradicional y de alto consumo por el pueblo mexicano que por su abundancia en mucílago se origina una razón suficiente para buscar alternativas y así explotar los residuos generados de las podas de cultivos de nopal ya que actualmente se desechan cantidades importantes por la presencia de plagas, desaprovechando la oportunidad de extraer el mucílago para futuras investigaciones y aplicaciones. Además, según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, aproximadamente un tercio de las partes comestibles de los alimentos producidos para el consumo humano se pierden o desperdician a nivel mundial, por esto la importancia de aprovechar el mucílago el cual es un subproducto que normalmente se desecha, pero que mediante esta investigación se propone secar el mucílago y aprovecharlo como un aditivo con alta funcionalidad.

La GM y el MN han sido ampliamente estudiados de manera individual, este trabajo tiene la finalidad de realizar mezclas de ambos biopolímeros para encontrar posibles efectos sinérgicos que permitan proponer las mezclas de GM-MN como sistemas de aditivos alternativos para su aplicación en el desarrollo de alimentos por la industria alimentaria.

# ***HIPÓTESIS***

### **3. HIPÓTESIS**

La mezcla de goma de mezquite-mucílago de nopal (GM-MN) presenta un efecto sinérgico en sus propiedades funcionales lo que permite formular sistemas coloidales.

## ***OBJETIVOS***

## **4. OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Analizar las propiedades funcionales y fisicoquímicas de mezclas goma de mezquite-mucílago de nopal.

### **Objetivos específicos**

- Extraer mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) mediante un proceso fisicoquímico.
- Obtener la solubilidad en agua, la capacidad de retención de agua y capacidad de retención de aceite de las mezclas de goma de mezquite – mucílago de nopal para que permitan analizar su comportamiento fisicoquímico.
- Evaluar las propiedades funcionales de las mezclas de goma de mezquite – mucílago de nopal mediante las pruebas de capacidad y estabilidad, tanto emulsionante como espumante.

## ***MATERIALES Y MÉTODOS***

## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1. Materiales**

La goma de mezquite (*Prosopis laevigata*) se recolectó en San Luis Potosí, México, en forma de lágrimas, se pulverizó, se purificó y se secó por aspersion usando el método de Vernon-Carter et al. (1996), su contenido de humedad inicial fue de  $6.90 \pm 0.15\%$ .

Los cladodios de nopales (*Opuntia ficus indica*) se obtuvieron en la central de abastos de la Ciudad de Toluca, Estado de México, México, y se trataron eliminando las espinas de la piel; su contenido de humedad inicial fue de  $93.40 \pm 0.10\%$ .

Todos los reactivos de grado analítico se adquirieron en Sigma–Aldrich Química, S.A. de C.V., en Toluca, Estado de México, México. En todos los experimentos se utilizó agua deionizada y/o destilada.

### **5.2. Extracción de mucílago de nopal**

El mucílago de nopal (MN) se extrajo de los cladodios siguiendo el método de León-Martínez et al. (2010) con ligeras modificaciones. Los cladodios de nopal se cortaron en rebanadas con un área de contacto de  $36 \text{ cm}^2$  y un grosor de  $2 \pm 0.2 \text{ mm}$ . Las rebanadas se pesaron y se colocaron en un contenedor de acero inoxidable al cual se adicionó agua destilada en una proporción 1:2.5 nopal-agua destilada. La mezcla se llevó a una temperatura de  $86^\circ\text{C}$  por 2.5 h bajo agitación con un agitador modelo BDC-3030 (Caframo, Ontario, Canadá). El mucílago extraído se separó de la fase sólida por filtración usando una malla metálica No.100. El MN filtrado se colocó en charolas de aluminio y se secó a una temperatura de  $65^\circ\text{C}$  por 4 h utilizando un horno de convección modelo HCX II (San-son plus, Edo. de México, México). El tamaño del mucílago en polvo se estandarizó usando una malla No. 40 ( $420 \mu\text{m}$ ).



### 5.3. Caracterización fisicoquímica de las mezclas GM-MN

#### 5.3.1. Solubilidad en agua

La solubilidad en agua se determinó usando el método de López-Franco et al. (2013) con ligeras modificaciones. Brevemente, 10 mL de las dispersiones acuosas de GM, MN y GM-MN (75-25, 50-50 y 25-75) se prepararon al 10% (w/v) y se agitaron por 30 min a 20°C. Las dispersiones acuosas fueron centrifugadas a  $800 \times g$  por 15 min y el sobrenadante de cada muestra se secó en una estufa de laboratorio modelo E-51 (Riossa, Ciudad de México, México) a 100°C por 12 h. La solubilidad fue calculada usando la ecuación (1):

$$\%Solubilidad = \left(\frac{w_f}{w_i}\right) \times 100 \quad (1)$$

Donde  $w_f$  es el peso final de la goma recuperada de la dispersión y  $w_i$  es el peso inicial de la goma usada para preparar las dispersiones acuosas.

#### 5.3.2. Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua (CRA) se determinó de acuerdo con el método descrito por Sciarini et al. (2009). Las dispersiones acuosas de GM, MN y GM-MN (75-25, 50-50 y 25-75) se prepararon de la siguiente manera: 0.25 g de cada biopolímero (puro o en mezcla) se pesaron en un tubo de ensayo de 15 mL y se le adicionaron 10 mL de agua destilada con 0.02% de azida de sodio. Las muestras se dejaron en reposo durante la noche a 20°C, posteriormente los tubos se centrifugaron a  $1600 \times g$  por 10 min, el sobrenadante se desechó y la muestra hinchada se pesó. La CRA fue calculada usando la ecuación (2):

$$CRA = \frac{w_S - w_0}{w_0} \quad (2)$$

donde  $w_S$  y  $w_0$  son los pesos de la muestra hinchada (g) y la muestra seca (g), respectivamente (Timilsena et al., 2016b). Los resultados se expresaron como masa (g) de agua retenida por masa (g) de goma.

### 5.3.3. Capacidad de retención de aceite

La capacidad de retención de aceite (CRAc) se determinó de acuerdo con el método descrito por Segura-Campos et al. (2014). Las dispersiones de GM, MN y GM-MN (75-25, 50-50 y 25-75) se prepararon de la siguiente manera: 0.1 g del biopolímero (puro o en mezcla) se pesaron, se le adicionaron 20 mL de aceite de maíz (Cristal®, AGYDSA, Jalisco, México) y se mantuvieron en agitación por 1 hora. Las dispersiones se centrifugaron en tubos a 2200×g por 30 min, posteriormente, la capa de aceite se retiró y la muestra con el aceite retenido se pesó. La CRAc fue calculada usando la ecuación (3):

$$CRAc = \frac{w_h - w_0}{w_0} \quad (3)$$

Donde  $w_h$  es el peso de la goma con el aceite retenido y  $w_0$  es el peso inicial de la goma. Los resultados fueron expresados como la masa (g) de aceite retenido por masa (g) de goma (Coorey et al., 2014). La densidad del aceite de maíz fue de 0.92 g mL<sup>-1</sup>.

## 5.4. Propiedades funcionales de las mezclas GM-MN

### 5.4.1. Propiedades emulsionantes

#### 5.4.1.1. Capacidad emulsionante

Para determinar la capacidad emulsionante (CE) se prepararon 100 mL de las dispersiones acuosas de GM, MN y GM-MN (75-25, 50-50 y 25-75) al 1% (w/v). Los 100 mL de cada una de las dispersiones acuosas se homogeneizaron con 100 mL de aceite de maíz (Cristal®, AGYDSA, Jalisco, México) usando un homogeneizador Ultra-Turrax T50 (IKA®-WERKE Works Inc., Wilmington, NC, EUA) a 10,000 rpm por 10 min. Las muestras se centrifugaron usando una centrífuga modelo 5810 R (Eppendorf, Hamburgo, Alemania) a 1600×g por 15 min, posteriormente se midió el volumen final de la capa emulsionada. El porcentaje de CE fue calculado usando la ecuación (4) (Coorey et al., 2014):

$$\% CE = \frac{\text{Volumen final de la capa emulsionada}}{\text{Volumen total de la emulsión}} \times 100 \quad (4)$$

#### 5.4.1.2. Estabilidad emulsionante al calentamiento

Para medir la estabilidad emulsionante (Eemu), las emulsiones de GM, MN y GM-MN (75-25, 50-50 y 25-75) se prepararon utilizando el mismo procedimiento de la capacidad emulsionante en la sección 2.4.4.1, y posteriormente se sometieron a un tratamiento térmico. Las emulsiones se calentaron a 85°C por 30 min y se enfriaron a temperatura ambiente (20°C) usando un baño de agua fría. Las emulsiones se centrifugaron usando una centrífuga modelo 5810 R (Eppendorf, Hamburgo, Alemania) a 1600×g por 15 min y se midió el volumen de la capa emulsionada después del calentamiento. La Eemu al calentamiento fue calculada usando la ecuación (5) (Coorey et al., 2014):

$$\% EEmu = \frac{\text{Volumen de capa emulsionada después del calentamiento}}{\text{Volumen total de la emulsión}} \times 100 \quad (5)$$

#### 5.4.1.3. Índice de emulsionamiento $E_{24}$

Para determinar el índice de emulsionamiento  $E_{24}$  se prepararon dispersiones acuosas de GM, MN y GM-MN (75-25, 50-50 y 25-75) al 1% (w/w) y se ajustaron a diferentes valores de pH (5.0, 7.0 y 9.0) usando soluciones de HCl y/o NaOH a concentraciones de 0.1 N y 1.0 N. En un tubo de ensayo de 15 mL (17 x 120 mm) se adicionaron 2 mL de cada dispersión acuosa y 2 mL de aceite mineral (Botica La Moderna, Toluca, México) y se agitaron usando un agitador orbital Vortex 3 (IKA, Alemania) por 2 min, posteriormente, las muestras se dejaron reposar por 24 h. El índice de emulsionamiento  $E_{24}$  se calculó utilizando la ecuación (6) (Techaoei et al., 2011).

$$\% E_{24} = \frac{\text{Altura de la capa emulsionada (cm)}}{\text{Altura total de la dispersión (cm)}} \times 100 \quad (6)$$

## 5.4.2. Propiedades espumantes

### 5.4.2.1. Capacidad espumante

La capacidad espumante (Cesp) se determinó usando el método de Kaewmanee et al. (2014) con ligeras modificaciones. 100 mL de dispersiones acuosas de GM, MN y GM-MN (75-25, 50-50 y 25-75) al 1% (w/w) se batieron usando un homogeneizador Ultra-Turrax T50 (IKA®-WERKE Works Inc., Wilmington, NC, EUA) a 10,000 rpm por 2 min. La Cesp se calculó usando la ecuación (7):

$$\% CEsp = \frac{\text{Volumen de espuma después del batido}}{\text{Volumen total de la muestra}} \times 100 \quad (7)$$

### 5.4.2.2. Estabilidad espumante

La estabilidad espumante (Eesp) se determinó de acuerdo con el método de Kaewmanee et al. (2014) con ligeras modificaciones. Para la Eesp se utilizó el mismo método de producción de espuma de la sección 2.4.5.1 y posteriormente, se realizó una cinética de estabilidad espumante registrando el volumen de espuma a diferentes tiempos (0, 5, 10, 20 y 30 min) (Rezaei et al., 2016). La Eesp a diferentes tiempos fue calculada usando la ecuación (8):

$$\% EEsp = \frac{\text{Volumen de espuma respecto al tiempo}}{\text{Volumen inicial de espuma}} \times 100 \quad (8)$$

## ***RESULTADOS Y DISCUSIÓN***

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Rendimiento del mucílago de nopal en polvo

El rendimiento promedio de la extracción del mucílago de nopal *Opuntia ficus indica* fue de  $16.2 \pm 1.0\%$ , base seca (b.s.), es decir, a partir de 1000 g de nopal fresco, con un contenido de humedad promedio de  $93.40 \pm 0.10\%$ , se obtuvieron en promedio 10.7 g de mucílago de nopal en polvo. Este valor es similar con resultados reportados por otros mucílagos, incluyendo mucílago de semillas *Plantago major* con un valor de 15.18% (Behbahani et al., 2017), mucílago de algas *Gracilaria corticata* con un valor de 22.62% (Archana et al., 2013), mucílago de jujube *Ziziphus mauritiana Lam* con un valor de 15.40 % (Thanatcha y Pranee, 2011). El rendimiento de extracción de mucílago típicamente varía de 3% a 35% dependiendo de varios parámetros, como el origen y genotipo botánico de la semilla, el pH y la temperatura del solvente de extracción, la duración de la extracción, la relación de sólidos de semilla a solvente, etc. (Soukoulis et al., 2018). Por lo tanto, debido al rendimiento obtenido se muestra como una opción viable para su uso como aditivo alimentario al mucílago *Opuntia ficus indica*, el cual se considera como un subproducto, lográndose transformar en un hidrocoloide comercial aprovechando un desecho alimenticio.

Así mismo, tomando en cuenta los rendimientos de otros mucílagos del género *Opuntia*, por ejemplo, el mucílago *Opuntia monacantha (Willd.) Haw* con un valor de 12% (Dick et al., 2019) y el mucílago de Cladodios de *Opuntia dillenii (Ker-Gawl) Haw* con un valor de 6.2% (Kalegowda et al., 2017), el *Opuntia ficus indica* es ligeramente mayor que los resultados anteriores de otras especies de *Opuntia*. Las diferencias en el rendimiento pueden deberse a la variación de las especies, factores edáficos, método de extracción y edad de los cladodios. (Kalegowda et al., 2017).

Se debe aclarar que el contenido de mucílago en el nopal en las diferentes especies depende de las condiciones ambientales a las que estén expuestas, a la especie de nopal y la edad que tienen los cladodios siendo que el mayor contenido de mucílago se encuentra en el parénquima que usualmente tiene mayor lugar en las pencas adultas (2-3 años) (Vargas-Rodríguez et al., 2018).

## 6.2. Caracterización fisicoquímica de las mezclas GM-MN

### 6.2.1. Solubilidad en agua

En el cuadro 6 se presentan los resultados de solubilidad en agua a 20°C de la goma de mezquite GM, mucílago de nopal MN, y sus mezclas (75-25, 50-50, 25-75). Se observó el mayor valor de solubilidad en agua para la GM siendo de  $84.30 \pm 0.53\%$ , y teniendo un decremento en las mezclas conforme disminuía la concentración de GM, dando como valor más bajo el del mucílago de nopal de  $56.74 \pm 0.40$ . Los valores de solubilidad se pueden comparar con los reportados para el mucílago de las semillas de chíá a 25°C con 66% (Capitani et al., 2013), la goma de la semilla de durian (*D. zibethinus*) a 25°C con 7-19.21% (Amid y Mirhosseini, 2012) y el mucílago de la semilla de tamarindo a 25° con 8.02% (Alpizar-Reyes et al., 2017), siendo estos valores más bajos al obtenido por la GM. El alto valor de solubilidad es una indicación de la alta pureza de la estructura química de la GM, ya que las interacciones entre un hidrocoloide y agua dependen de la unión de hidrógeno y la temperatura de la misma manera como la formación de agrupaciones de agua. El tamaño molecular y la estructura de la goma de polisacárido influyen en el mecanismo de solubilidad y su capacidad de autoasociarse (interacciones intracadena e intercadena) (Amid y Mirhosseini, 2012).

La GM al presentar un alto valor de solubilidad se presenta como un hidrocoloide favorable para mantener las propiedades funcionales deseables, siendo beneficioso también desde el punto de vista de la apariencia y la textura.

**Cuadro 6.** Solubilidad en agua de la GM, MN y mezclas GM-MN.

	Solubilidad en agua (20°C)
GM	$84.30 \pm 0.53^a$
75-25 GM-MN	$80.91 \pm 0.20^b$
50-50 GM-MN	$70.50 \pm 0.09^c$
25-75 GM-MN	$67.09 \pm 1.62^d$
MN	$56.74 \pm 0.40^e$

Los resultados son promedios  $\pm$  DE (n=3).

Los resultados con letras diferentes indican diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ).

GM: goma de mezquite; MN: mucílago de nopal.

### **6.2.2. Capacidad de retención de agua**

En el cuadro 7 se muestran los resultados de la capacidad de retención de agua (CRA) en g de agua/ g de polvo, de la goma de mezquite (GM), mucílago de nopal (MN) y sus mezclas (GM-MN). El valor más alto de CRA fue obtenido por el MN ( $2.46 \pm 0.07$  g de agua/ g de polvo), así mismo se observa un decremento de la CRA en las mezclas GM-MN conforme la concentración de MN disminuye, y dando como valor más bajo de CRA a la GM ( $0.56 \pm 0.06$  g de agua/ g de polvo). El bajo valor de la capacidad de retención de agua de la GM puede atribuirse a su alta solubilidad, lo que conduce a una incapacidad para formar un gel (Keshani-Dokht et al., 2018).

Valores similares a los del MN se han reportado para la goma de la semilla de durian (1.395-2.740 g de agua/ g de goma) (Amid y Mirhosseini, 2012), para el mucílago extraído de la semilla de tamarindo (1.07 g de agua/ g de muestra) (Alpizar-Reyes et al., 2018) y la cáscara de mandarina fresca (2.811 g de agua/ g materia seca) (Ghanem et al., 2012). La CRA del mucílago de nopal se puede atribuir a la presencia de regiones hidrófilas (Kalegowda et al., 2017).

La capacidad de retención de agua contribuye a la estabilización de la estructura de los alimentos (dispersiones, emulsiones y espumas) al modificar las propiedades reológicas de la fase continua (Ghanem et al., 2012). Del mismo modo, dado que la CRA es una característica crítica de las fibras dietéticas desde un punto de vista fisiológico y tecnológico el MN se podría utilizar como una fuente potencial de fibra dietética.

### **6.2.3. Capacidad de retención de aceite**

Los resultados de la capacidad de retención de aceite (CRAc) en g de aceite/ g de polvo de la GM, MN, y las mezclas GM-MN se muestran en el cuadro 7. De igual modo que los resultados de la capacidad de retención de agua, el valor más alto fue dado por el MN ( $1.75 \pm 0.05$  g de aceite/ g de polvo), y se observa un decremento de CRAc en las mezclas GM-



MN a medida que la concentración del MN disminuye, la GM dio el valor más bajo de CRAC ( $1.04 \pm 0.05$  g de aceite/ g de polvo). El alto valor de la CRAC del MN se debe a la presencia de moléculas no polares (su alto contenido de proteína), que pueden atrapar una gran cantidad de partículas de aceite y, por lo tanto, evitar la pérdida de sabor y aceite de los sistemas alimentarios. Por lo tanto, el mucílago extraído se puede usar como un ingrediente funcional en alimentos formulados para evitar la sinéresis (Kalegowda et al., 2017).

Se han reportado valores similares de la CRAC por algunos biopolímeros como el mucílago extraído de cladodios de *Opuntia dillenii* (Ker-Gawl) Haw (2 g de aceite/ g de muestra seca) (Kalegowda et al., 2017), por el mucílago extraído de frutos *Cordia myxa* (2.04 g agua/ g muestra) (Keshani-Dokht et al., 2018), por la goma de la semilla de durian (0.832-1.465 g de aceite/ g de goma) (Amid y Mirhosseini, 2012) y por la cáscara de limón seca (1.8 g de aceite/ g de materia seca) (Ghanem et al., 2012).

Por otra parte, a pesar de que la GM obtuvo el valor más bajo de CRAC, es mayor que el reportado por gomas comerciales como la xantana y guar (0.79 y 0.57 g de aceite/ g de muestra seca, respectivamente) (Thanatcha y Pranee, 2011), por lo que de igual manera la GM podría desempeñar un papel importante en el procesamiento de alimentos.

Una alta CRAC puede disminuir la absorción de lípidos de los alimentos ingeridos al afectar su absorción en el tracto gastrointestinal, por lo tanto, puede ayudar a controlar los lípidos en sangre y el peso corporal. En la industria alimentaria, esto es importante para estabilizar la textura de los alimentos y emulsiones con alto contenido de grasa. Por lo tanto, los hidrocoloides con alto contenido de CRA y CRAC pueden ser útiles como ingrediente funcional para producir alimentos formulados más saludables con una mejor textura. (Keshani-Dokht et al., 2018) Debido a la capacidad del MN para mantener el agua y el aceite, se puede esperar que este biopolímero se pueda utilizar como un ingrediente funcional adecuado en los sistemas alimentarios.

**Cuadro 7.** Capacidad de retención de agua y capacidad de retención de aceite de la GM, MN y mezclas GM-MN.

	<i>CRA</i> (g de agua/ g de polvo)	<i>CRAc</i> (g de aceite/ g de polvo)
GM	0.56 ± 0.06 <sup>d, 1</sup>	1.04 ± 0.05 <sup>b</sup>
75-25 GM-MN	0.89 ± 0.03 <sup>c</sup>	1.20 ± 0.07 <sup>b</sup>
50-50 GM-MN	1.08 ± 0.07 <sup>c</sup>	1.56 ± 0.12 <sup>a</sup>
25-75 GM-MN	1.63 ± 0.09 <sup>b</sup>	1.71 ± 0.05 <sup>a</sup>
MN	2.46 ± 0.07 <sup>a</sup>	1.75 ± 0.05 <sup>a</sup>

<sup>1</sup>La GM prácticamente se solubilizó en agua.

Los resultados son promedios ± DE (n=3).

Los resultados con letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa (p≤0.05).

GM: goma de mezquite; MN: mucílago de nopal; *CRA*: capacidad de retención de agua; *CRAc*: capacidad de retención de aceite.

### 6.3. Propiedades funcionales de las mezclas GM-MN

#### 6.3.1. Propiedades emulsionantes

##### 6.3.1.1. Capacidad emulsionante

Los resultados de la capacidad emulsionante (CE) de la GM, MN y mezclas GM-MN se muestran en el cuadro 8. Se observa que la mayor CE fue para la GM (98.40 ± 0.68%), y en cuanto va disminuyendo la concentración de GM en las mezclas la CE disminuye, y dando como valor más bajo al MN (51.94 ± 1.97%). Valores similares a la CE de la GM han sido reportados para la goma xantana con valor de 100% (Scianri et al., 2009) y al mucílago de la semilla de tamarindo con un valor entre 78.33-90% (Alpizar-Reyes et al., 2017).

También existen valores reportados similares al obtenido por el MN como el mucílago de algas (*Gracilaria corticata*) y el mucílago extraído de residuos de okra (*Abelmoscus esculentus*) con 52.38% y 54.76%, respectivamente (Archana et al., 2013), para el mucílago de jujube *Ziziphus mauritiana Lam* y la goma guar, con 52.22% y 59.72% respectivamente (Thanatcha y Pranee, 2011).

El concepto de capacidad emulsionante se asocia comúnmente con moléculas de superficie activa que tienen la capacidad de reducir la tensión superficial (Scianiri et al., 2009), por lo tanto, la GM y el MN son buenos agentes emulsionantes porque ambos tienen una superficie activa y naturaleza anfifílica. La actividad superficial puede ser causada por la presencia de algunos constituyentes hidrófobos, como los grupos metilo y acetilo, y la fracción proteica, por la cual puede variar la diferencia de CE entre ambos biopolímeros (Dick et al., 2018).

Esta capacidad de emulsión puede estar relacionada con la estabilidad del producto, como el aderezo para ensaladas, ya que puede mejorar la formación de pequeñas gotas y reducir la velocidad a la que las gotas se unen (Archana et al., 2013).

### **6.3.1.2. Estabilidad emulsionante al calentamiento**

En el cuadro 8 se muestran los resultados de estabilidad emulsionante al calentamiento (EEmu) obtenidos por la GM, MN y sus mezclas GM-MN. El mayor valor fue para la mezcla 75-25 GM-MN ( $69.38 \pm 0.88\%$ ), aunque no tuvo diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) con los valores obtenidos por la GM y la mezcla 50-50 GM-MN ( $67.12 \pm 0.64\%$  y  $67.03 \pm 0.51\%$ , respectivamente). Se observa una disminución de EEmu al disminuir la concentración de GM, por lo que el valor más bajo fue para el MN ( $51.96 \pm 0.22\%$ ).

Valores similares a los obtenidos en este trabajo han sido reportados para el mucílago de semillas *Plantago major*. (67.4%) (Behbahani et al., 2017), para la goma asafétida y la goma Arábica (76.2% y 66.7%, respectivamente) (Saeidy et al., 2018). También han sido reportados valores mayores como el del mucílago *Opuntia monacantha* (Willd.) Haw (96%) (Dick et al., 2019), el mucílago de la semilla de tamarindo (91.96%-82.22%) (Alpizar-Reyes et al., 2017) y la goma guar (90%) (Scianiri et al., 2009). La estabilidad de la emulsión está fuertemente influenciada por la floculación, coalescencia y cremosidad en presencia de polisacáridos (Behbahani et al., 2017). En general, se asume que la principal contribución de los polisacáridos hidrófilos a la EEmu es al aumentar la viscosidad de la fase continua que rodea a las gotitas de aceite, lo que impide el movimiento molecular y reduce la tendencia a la coalescencia de partículas (Dick et al., 2018).

Con estos resultados se demuestra que la GM y el MN exhiben buenas propiedades funcionales en términos de capacidad emulsionante y estabilidad emulsionante al calentamiento y, por lo tanto, se pueden usar de manera rentable como sustituto de agentes espesantes y estabilizantes en la industria alimentaria.

**Cuadro 8.** Propiedades emulsionantes de la GM, MN y mezclas GM-MN.

	Capacidad emulsionante (%)	Estabilidad emulsionante al calentamiento (%)
GM	98.40 ± 0.68 <sup>a</sup>	67.12 ± 0.64 <sup>a</sup>
75-25 GM-MN	92.39 ± 0.00 <sup>b</sup>	69.38 ± 0.88 <sup>a</sup>
50-50 GM-MN	62.00 ± 1.41 <sup>c</sup>	67.03 ± 0.51 <sup>a</sup>
25-75 GM-MN	50.82 ± 0.41 <sup>d</sup>	60.32 ± 0.62 <sup>b</sup>
MN	51.94 ± 1.97 <sup>d</sup>	51.96 ± 0.22 <sup>c</sup>

Los resultados son promedios ± DE (n=3).

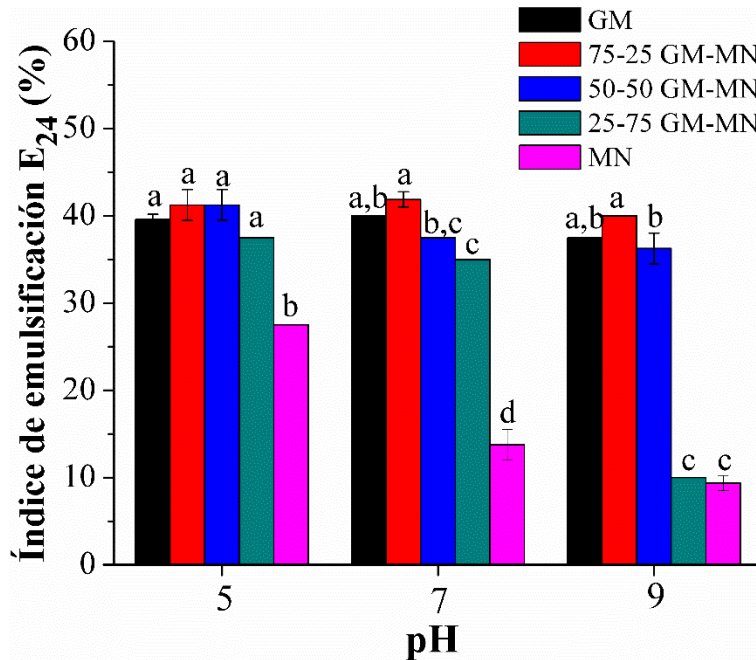
Los resultados con letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ).

GM: goma de mezquite; MN: mucílago de nopal.

### 6.3.1.3. Índice de emulsiónamiento E<sub>24</sub>

Los resultados obtenidos del índice de emulsiónamiento E<sub>24</sub> de la GM, MN y las mezclas GM-MN se muestran en la figura 2, a valores de pH de 5, 7 y 9 con aceite mineral como fase dispersa. El valor mayor de E<sub>24</sub> fue obtenido por la mezcla 75-25 GM-MN a pH 7, con un valor de 41.9±0.9%, además no tuvo diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) a pH 5 y 9. El valor de E<sub>24</sub> disminuyó conforme disminuía la concentración de GM, por lo tanto, el valor más bajo fue para el MN a pH 9 con un valor de 9.4±0.9 %, es importante mencionar que el MN presentó actividad emulsionante, pero produjo las emulsiones más inestables después de 24 horas de reposo. Al ser mezclado con la GM a cualquier proporción a pH 5 y 7 mejoró la estabilidad de la emulsión significativamente.

Valores de E<sub>24</sub> similares o mayores a los obtenidos en este trabajo fueron reportados para la goma arábica, goma tragacanto y goma karaya al 3.5% (w/v) (33%, 67% y 69%, respectivamente) utilizando xileno como fase dispersa (Freitas *et al.*, 2009).



**Figura 3.** Índice de emulsiónamiento ( $E_{24}$ ) a diferentes valores de pH (5, 7 y 9) de GM, MN y mezclas GM-MN. Letras distintas indican diferencia significativa entre muestras, por cada valor de pH ( $p \leq 0.05$ ).

### 6.3.2. Propiedades espumantes

#### 6.3.2.1. Capacidad espumante

En la figura 3a se muestran los resultados obtenidos de capacidad espumante (CEsp) de la GM, MN y las mezclas GM-MN. El valor más alto fue para el MN (43%), observándose un decremento de CEsp en las mezclas conforme disminuye la concentración de MN. Este efecto se atribuye al aumento de la cantidad de mucílago, que es transportado a la interfase para formar películas viscoelásticas que mejoran la formación de espuma (Alpizar-Reyes et al., 2017).

La GM y la mezcla GM-MN 75-25 al 1% (w/v) no presentaron CEsp, lo cual puede estar relacionado a sus bajos valores de viscosidad. Las muy bajas propiedades de formación de espuma de algunas muestras de biopolímero podrían deberse a una muy baja alineación de los polisacáridos en la interfase aire-agua (Kaewmanee et al., 2014).

Se han reportado valores similares o mayores a los obtenidos por la GM, como el del mucílago de la semilla de tamarindo al 1% (w/v) con un valor de 16.304% (Alpizar-Reyes et al., 2017), al de la goma asafétida al 2% (w/w) con un valor de 53% (Saeidy et al., 2018) y el mucílago de la semilla de lino al 1% (w/v) con un valor de 25% (Kaewmanee et al., 2014). La presencia de polisacáridos en una solución espumosa basada en proteínas produce un efecto positivo sobre las propiedades espumantes, atribuido al aumento de la viscosidad de la fase acuosa y al rol adicional del polisacárido en la formación de una película flexible cohesiva alrededor de la burbuja de aire que mejora la formación de espuma (Dick et al., 2018).

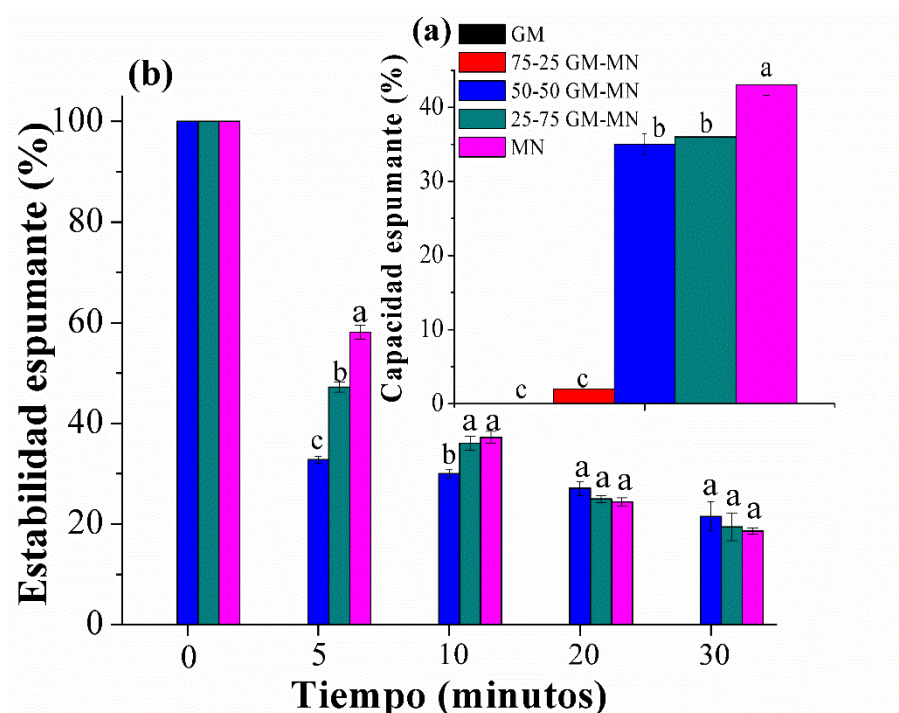
### **6.3.2.2. Estabilidad espumante**

La estabilidad espumante (EEsp) con respecto al tiempo de la GM, MN y las mezclas GM-MN se muestra en la figura 3. Las mezclas 50-50, 25-75 GM-MN y el MN, que tuvieron capacidad espumante, no formaron espumas estables ya que el volumen de la espuma disminuyó en 5 min del 100% al 33%, 47% y 58%, respectivamente. A los 30 min, el MN tuvo una EEsp del 19% y este resultado no tuvo diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) respecto a la EEsp de las mezclas 50-50 y 25-75 GM-MN.

Se comparó la EEsp obtenida en este trabajo con otros mucílagos a la misma concentración (1% w/v) y tiempo (30 min), obteniendo un resultado similar con el mucílago extraído de la semilla de tamarindo (13.737%) (Alpizar-Reyes et al., 2017), y un resultado menor con respecto al obtenido por el mucílago de semillas *Plantago major* (88.45) (Behbahani et al., 2017).

En general, un factor clave que confiere tanto la facilidad de preparación como la estabilidad de las espumas es la naturaleza y la movilidad de las moléculas tensoactivas en la interfaz de dos fases. Aunque las gomas de polisacáridos generalmente no se consideran agentes tensoactivos, se ha demostrado que pueden aumentar las propiedades espumantes de los sistemas de proteínas, aumentando la viscosidad de la fase mayor y creando una red de biopolímeros que previene la coalescencia de burbujas de aire. Además, la presencia de una pequeña cantidad de material proteico en el mucílago puede estar asociada con las

propiedades interfaciales (Kaewmanee et al., 2014). Las propiedades interfaciales del MN están relacionadas con la cantidad de proteína que posee, por lo que se le confieren propiedades espumantes moderadas, con lo cual puede ser útil como agente espumante en la industria alimentaria.



**Figura 4.** Propiedades espumantes de GM, MN y mezclas GM-MN, (a) capacidad espumante y (b) estabilidad espumante en función del tiempo. Letras distintas indican diferencia significativa entre muestras, por cada tiempo ( $p \leq 0.05$ ).

#### 6.4. Posibles aplicaciones de mezclas de GM-MN en el desarrollo de alimentos

Ya analizadas las características fisicoquímicas y las propiedades funcionales de la GM, MN y las mezclas GM-MN se mencionarán algunos desarrollos de alimentos donde se podrían utilizar estos sistemas de aditivos, por ejemplo, para estabilizar, donde se requieren tanto propiedades emulsionantes como espumantes como alguna crema batida o espuma de café.

Al igual que el mucílago obtenido de cladodios de *Opuntia monacantha* (Willd.) Haw, los resultados revelan el potencial prometedor de los sistemas GM-MN para ser usados como un

sustituto de la clara de huevo en algunas aplicaciones, como en productos de panadería y helados, o como un estabilizador de espuma en bebidas espumosas (como capuchino y cerveza). Por lo tanto, estas propiedades de formación de espuma podrían abordarse para desarrollar productos sin huevo, beneficiando al consumidor que es alérgico a los huevos o para satisfacer la demanda de productos veganos (Dick et al., 2018).

Otra aplicación en cuanto a los resultados con la capacidad de retención de aceite, los sistemas propuestos se pueden aprovechar en los alimentos (productos cárnicos cocidos) para mejorar su retención de grasa que normalmente se pierde durante la cocción (Ghanem et al., 2012), esta propiedad tiene muchos efectos sobre la textura de los alimentos, por ejemplo, si la absorción de aceite es alta en el producto cárnico, ayuda a reducir las pérdidas de sabor y aceite durante la cocción de la carne (Thanatcha y Pranee, 2011). Por lo que las mezclas GM-MN podrían desempeñar un papel importante en el procesamiento de alimentos ya que la grasa actúa sobre los conservadores de sabor y aumenta la sensación en la boca de los alimentos.

Además de la aplicación que se comprobó en el trabajo de doctorado que fue el uso de estas mezclas para realizar emulsiones que posteriormente fueron secadas por aspersión para microencapsular aceite esencial de limón y proteger al aceite contra la oxidación alargando su vida de anaquel (Cortés-Camargo *et al.*, 2017).



## ***CONCLUSIONES***

## 7. CONCLUSIONES

El rendimiento del mucílago extraído de los cladodios de nopal *Opuntia ficus indica* fue aceptable comparado con otros mucílagos como el mucílago de semillas *Plantago major* y el mucílago de algas *Gracilaria corticata*, al igual que en comparación con otras especies del género *Opuntia*, teniendo en cuenta que el mucílago es un subproducto de un recurso regional abundante, fácil de extraer, barato y con propiedades similares a los hidrocoloides más utilizados.

Las dispersiones acuosas realizadas de las mezclas GM-MN, así como de los biopolímeros individuales, tuvieron propiedades funcionales, emulsionantes y espumantes, debido a características fisicoquímicas como su alta solubilidad en agua y su capacidad de retener agua y aceite. En términos de solubilidad se encontró que fue mayor para la goma de mezquite, y así mismo era favorecida a mayor concentración de GM en las mezclas GM-MN, por el contrario, el mucílago de nopal presentó los mejores valores de capacidad de retención de agua y aceite, disminuyendo los valores a menor concentración de dicho biopolímero. Por lo tanto, estos sistemas de aditivos en sus diferentes proporciones pueden funcionar como ingredientes funcionales ayudando a mantener propiedades deseables.

La GM tuvo la mayor capacidad emulsionante, por el contrario, el MN tuvo la mayor capacidad espumante y al mezclarse ambos biopolímeros no se observó efecto sinérgico en las propiedades funcionales, sin embargo, se encontró que a mayor concentración de GM en las mezclas GM-MN hubo mayor capacidad emulsionante, por el contrario, a mayor concentración de MN en las mezclas GM-MN hubo mayor capacidad espumante.

Las mezclas GM-MN presentaron ambas propiedades emulsionantes y espumantes que podrían ser moduladas, variando sus proporciones, de acuerdo a la aplicación deseada en el desarrollo de productos alimentarios. Por lo tanto, las mezclas de GM-MN son sistemas de aditivos que emergen como alternativas de interés para la industria alimentaria.

Así mismo, la relación entre las características fisicoquímicas y las propiedades emulsificantes y espumantes de los biopolímeros estudiados individualmente sugieren que ambos pueden competir exitosamente con otros aditivos comerciales como la goma Arábiga, los cuales llegan a presentar escasez e inseguridad en los suministros, además de precios fluctuantes, por lo cual la goma de mezquite y el mucílago de nopal, siendo productos nacionales se presentan como dos buenas fuentes botánicas de aditivos, para reemplazar gomas comerciales, aprovechando estos productos que pueden formar alternativas económicas y sostenibles más acordes para la industria.

## ***REFERENCIAS***

## 8. REFERENCIAS

- Alcázar-Fabra, M., García, L., Lara, N., Márquez, M.J. (2012). Los coloides. Sistemas coloidales no cargados. ¿Cómo se agregan y cómo se estabilizan?. *MoleQla. Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavid*, 7, 94-96.
- Amid, B.T., Mirhosseini, H. (2012). Optimisation of aqueous extraction of gum from durian (*Durio zibethinus*) seed: A potential, low cost source of hydrocolloid. *Food Chemistry*, 132, 1258–1268.
- Archana, G., Sabina, K., Babuskin, S., Radhakrishnan, K., Fayidh, M.A., Babu, P.A.S., Sivarajan, M., Sukumar, M. (2013). Preparation and characterization of mucilage polysaccharide for biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, 98, 89–94.
- Basiri, S., Haidary, N., Shekarforoush, S.S., Niakousari, M. (2018). Flaxseed mucilage: A natural stabilizer in stirred yogurt. *Carbohydrate Polymers*, 187, 59-65.
- Behbahani, B.A., Yazdi, F.T., Shahidi, F., Hesarinejad, M.A., Mortazavi, S.A., Mohebbi, M. (2017). Plantago major seed mucilage: Optimization of extraction and some physicochemical and rheological aspects. *Carbohydrate Polymers*, 155, 68–77.
- Benhura, M.A.N., Chidewe, C.K. (2004). The emulsifying properties of a polysaccharide isolated from the fruit of *Cordia abyssinica*. *International Journal of Food Science and Technology*, 39, 579–583.
- Capitani, M.I., Ixtaina, V.Y., Nolasco, S.M., Tomás, M.C. (2013). Microstructure, chemical composition and mucilage exudation of chia (*Salvia hispanica L.*) nutlets from Argentina. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(15), 3856-3862.
- Chen, C., Wu, L., Perdjon, M., Huang, X., Peng, Y. (2019). The drying effect on xanthan gum biopolymer treated sandy soil shear strength. *Construction and Building Materials*, 197, 271-279.
- Contreras-Padilla, M., Rodríguez-García, M.E., Gutiérrez-Cortez, E., Valderrama-Bravo, M.C., Rojas-Molina, J.I., Rivera-Muñoz, E.M. (2016). Physicochemical and rheological characterization of *Opuntia ficus* mucilage at three different maturity stages of cladode. *European Polymer Journal*, 78, 226–234.

- Dehnad, D., Jafari, S. M., Afrasiabi, M. (2016). Influence of drying on functional properties of food biopolymers: from traditional to novel dehydration techniques. *Trends in Food Science & Technology*, 57, 116-131.
- Dick, M., Dal-Magro, L., Costa-Rodrigues, R., Oliveira-Rios, A., Hickmann-Flôres, S. (2019). Valorization of *Opuntia monacantha* (Willd.) Haw. cladodes to obtain a mucilage with hydrocolloid features: Physicochemical and functional performance. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123, 900–909.
- Dickinson, E. (1992). Introduction to food colloids. Oxford: Oxford University Press.
- Fathi, M., Emam-Djomeh, Z., Sadegui-Varkani, A. (2018). Extraction, characterization and rheological study of the purified polysaccharide from *Lallemantia ibrica* seeds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120, 1265–1274.
- Foegeding, E.A., Luck, P.J., Davis, J.P. (2006). Factors determining the physical properties of protein foams. *Food Hydrocolloids*, 20, 284-292.
- Freitas, F., Alves, V.D., Carvalheira, M., Costa, N., Oliveira, R., Reis, M.A.M. (2009). Emulsifying behaviour and rheological properties of the extracellular polysaccharide produced by *Pseudomonas oleovorans* grown on glycerol byproduct. *Carbohydrate Polymers*, 78, 549-556.
- García-Cruz, E.E., Rodríguez-Ramírez, J., Méndez-Lagunas, L.L., Medina-Torres, L. (2013). Rheological and physical properties of spray-dried mucilage obtained from *Hylocereus undatus* cladodes. *Carbohydrate Polymers*, 91, 394–402.
- Ghanem, N., Mihoubi, D., Kechaou, N., Mihoubi, N. B. (2012). Microwave dehydration of three citrus peel cultivars: Effect on water and oil retention capacities, color, shrinkage and total phenols content. *Industrial Crops and Products*, 40, 167–177.
- Gharibzahedi, S.M.T., Razabi, S.H., Mousavi, S.M. (2013). *Psyllium husk* gum: An attractive carbohydrate biopolymer for the production of stable canthaxanthin emulsions. *Carbohydrate Polymers*, 92, 2002–2011.

- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40, 1107–1121.
- Ghori, M.U., Mohammad, M.A., Rudrangi, S.S., Fleming, L.T., Merchant, H.A., Smith, A.M., Conway, B.R. (2017). Impact of purification on physicochemical, surface and functional properties of okra biopolymer. *Food Hydrocolloids*, 71, 311-320.
- Golalikhani, M., Khodaiyan, F., Khosravi, A. (2014). Response surface optimization of mucilage aqueous extraction from flaxweed (*Descurainia sophia*) seeds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 70, 444–449.
- Hung, P.-Y., Lai, L.-S. (2019). Structural characterization and rheological properties of the water extracted mucilage of *Basella alba* and the starch/aqueous mucilage blends. *Food Hydrocolloids*, 93, 413–421.
- Ibrahim, S., Riahi, O., Said, S.M., Sabri, M.F.M., Rozali, S. (2019). Biopolymers From Crop Plants. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.
- Kaewmanee, T., Bagnasco, L., Benjakul, S., Lanteri, S., Morelli, C.F., Speranza, G., Cosulich, M.E. (2014). Characterisation of mucilages extracted from seven Italian cultivars of flax. *Food Chemistry*, 148, 60-69.
- Kalegowda, P., Chauhan, A. S., Urs, S.M.N. (2017). *Opuntia dillenii* (Ker-Gawl) Haw cladode mucilage: Physico-chemical, rheological and functional behavior. *Carbohydrate Polymers*, 157, 1057–1064.
- Keshani-Dokht, S., Emam-Djomeh, Z., Yarmand, M.-S., Fathi, M. (2018). Extraction, chemical composition, rheological behavior, antioxidant activity and functional properties of *Cordia myxa* mucilage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118, 485–493.
- Khatami, H., O’Kelly, B. (2018). Prevention of bleeding of particulate grouts using biopolymers. *Construction and Building Materials*, 192, 202-209.

- León-Martínez, F.M., Méndez-Lagunas, L.L., Rodríguez-Ramírez, J. (2010). Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): Effects on powder properties and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 81, 864–870.
- Li, X., Li, S., Liang, X., McClements, D. J., Liu, X., Liu, F. (2020). Applications of oxidases in modification of food molecules and colloidal systems: Laccase, peroxidase and tyrosinase. *Trends in Food Science & Technology*, 103, 78-93.
- Li, X.Y., Li, D., Wang, L.J., Wu, M., Adhikari, B., (2012). The effect of addition of flaxseed gum on the rheological behavior of mixed flaxseed gum–casein gels. *Carbohydrate Polymers*, 88, 1214-1220.
- López-Franco, Y.L., Cervantes-Montaña, C.I., Martínez-Robinson, K.G., Lizardi-Mendoza, J., Robles-Ozuna, L.E. (2013). Physicochemical characterization and functional properties of galactomannans from mesquite seeds (*Prosopis spp.*). *Food Hydrocolloids*, 30, 656–660.
- López-Franco, Y.L., Córdova-Moreno, R.E., Goycoolea, F.M., Valdez, M.A., Juárez-Onofre, J., Lizardi-Mendoza, J. (2012) Classification and physicochemical characterization of mesquite gum (*Prosopis spp.*). *Food Hydrocolloids*, 26, 159-166.
- López-Franco, Y.L., Goycoolea, F.M., Valdez, M.A., Calderón de la Barca, A.M. (2006). Goma de mezquite: una alternativa de uso industrial. *Interciencia*, 31, 183-189.
- Manhivi, V.E., Venter, S., Amonsou, E.O., Kudanga, T. (2018). Composition, thermal and rheological properties of polysaccharides from amadumbe (*Colocasia esculenta*) and cactus (*Opuntia spp.*). *Carbohydrate Polymers*, 195, 163–169.
- Martin, A.A., Alves de Freitas, R., Sasaki, G. L., Evangelista, P.H.L., Sierakowski, M.R. (2017). Chemical structure and physical-chemical properties of mucilage from the leaves of *Pereskia aculeata*. *Food Hydrocolloids*, 70, 20-28.
- Medina, L., García, E.E., Calderas, F., González, R.F., Sánchez, G., Gallegos, J.A., Rocha, N.E., Rodríguez, J. (2013). Microencapsulation by spray drying of gallic acid with nopal mucilage (*Opuntia ficus indica*). *LWT - Food Science and Technology*, 50, 642-650.



- Medina-Torres, L., Brito-De La Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B., Katthain, R. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloids*, 14, 417–424.
- Mirhosseini, H., Amid, B.A. (2012). A review study on chemical composition and molecular structure of newly plant gum exudates and seed gums. *Food Research International*, 46, 387–398.
- Morris, E.R. (2009). *Modern Biopolymer Science*. (1st ed.). Oxford, UK: Elsevier Academic Press.
- Petera, B., Delattre, C., Pierre, G., Wadouachi, A., Elboutachfai, R., Engel, E., Poughon, L., Michaud, P., Fenoradosoa, T.A. (2015). Characterization of arabinogalactan-rich mucilage from *Cereus triangularis* cladodes. *Carbohydrate Polymers*, 127, 372–380.
- Prajapati, V.D., Jani, G.K., Moradiya, N.G., Randeria, N.P. (2013). Pharmaceutical applications of various natural gums, mucilages and their modified forms. *Carbohydrate Polymers*, 92, 1685–1699.
- Quinzio, C., Ayunta, C., López de Mishima, B., Iturriaga, L. (2018). Stability and rheology properties of oil-in-water emulsions prepared with mucilage extracted from *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. *Food Hydrocolloids*, 84, 154–165.
- Rivera-Corona, J.L., Rodríguez-González, F., Rendón-Villalobos, R., García-Hernández, E., Solorza-Feria, J. (2014). Thermal, structural and rheological properties of sorghum starch with cactus mucilage addition. *LWT - Food Science and Technology*, 59, 806–812.
- Rodea-González, D.A., Cruz-Olivares, J., Román-Guerrero, A., Rodríguez-Huezo, M.E., Vernon-Carter, E.J., Pérez-Alonso, C. (2012). Spray-dried encapsulation of chia essential oil (*Salvia hispanica* L.) in whey protein concentrate-polysaccharide matrices. *Journal of Food Engineering*, 111, 102–109.

- Rodríguez, E., Sandoval, A. (2003). Hidrocoloides naturales de origen vegetal. Investigaciones recientes y aplicaciones en la industria de alimentos. *Tecnura*, 7, 4-13.
- Rodríguez, E.N., Rojo, G.E., Ramírez, B., Martínez, R., Cong, M.C., Medina, S.M., Piña, H.H. (2014). Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis laevigata Humb. & Bonpl. ex Willd.*) en México. *Ra Ximhai*, 10, 173-193.
- Saiedy, S., Nasirpour, A., Djelveh, G., Ursu, A. V., Marcati, A., Gardarin, C., Laroche, C., Delattre, C., Pierre, G., Keramat, J., Michaud, P. (2018). Rheological and functional properties of asafoetida gum. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118, 1168–1173.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E., Matsuhiro, B. (2004). *Opuntia spp* mucilage's: a functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environments*, 57, 275–290.
- Salarbashi, D., Tafaghodi, M. (2018). An update on physicochemical and functional properties of newly seed gums. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, 1240-1247.
- Salehi, E., Emam-Djomeh, Z., Askari, G., Fathi, M. (2019). *Opuntia ficus indica* fruit gum: Extraction, characterization, antioxidant activity and functional properties. *Carbohydrate Polymers*, 206, 565–572.
- Santiago, J. S. J., Salvia-Trujillo. L., Palomo. A., Niroula. A., Xu. F., Van Loey. A. M., Hendrickx. M. E. (2018). Process-induced water-soluble biopolymers from broccoli and tomato purées: Their molecular structure in relation to their emulsion stabilizing capacity. *Food Hydrocolloids*, 81, 312-327.
- Schorsch, C., Jones, M.G., Norton, I.T. (1999). Thermodynamic incompatibility and microstructure of milk protein/locust bean gum/sucrose systems. *Food Hydrocolloids*, 13, 89-99.
- Scianiri, L.S., Maldonado, F., Ribotta, P.D., Pérez, G.T., León, A.E. (2009). Chemical composition and functional properties of *Gleditsia triacanthos* gum. *Food Hydrocolloids*, 23, 306–313.

- Sedagaht Doost, A., Nikbakht Nasrabadi, M., Kassoki, V., Nakisozi, H., Van der Meeren, P. (2020). Recent advances in food colloidal delivery systems for essential oils and their main components. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 474-486.
- Segura-Campos, M.R., Ciau-Solís, N., Rosado-Rubio, G., Chel-Guerrero, L., Betancur-Ancona, D. (2014). Chemical and functional properties of chia seed (*Salvia hispanica* L.) gum. *International Journal of Food Science*, Article ID 241053, 1–5.
- Soukoulis, C., Gaiani, C., Hoffman, L. (2018). Plant seed mucilage as emerging biopolymer in food industry applications. *Current Opinion in Food Science*, 22, 28-42.
- Thanatcha, R., Pranee, A. (2011). Extraction and characterization of mucilage in *Ziziphus mauritiana* Lam. *International Food Research Journal*, 18, 201-212.
- Vargas, L., Gamiño, Z., Fuentes, R., Contreras, D. (2018). Mucilago de nopal y su aplicación en la obtención de biopolímeros. *Naturaleza y Tecnología*, 5, 24-35.
- Vernon-Carter, E.J., Beristain, C.I., Pedroza-Islas, R. (2000). Mesquite gum (*Prosopis gum*). *Developments in Food Science*, 41, 217-238.
- Vernon-Carter, E.J., Gómez, S.A., Beristain, C.I., Mosqueira, G., Pedroza-Islas, R., Moreno-Terrazas, R.C. (1996). Color degradation and coalescence kinetics of Aztec marigold oleoresin-in-water emulsions stabilized by mesquite or Arabic gums and their blends. *Journal of Texture Studies*, 27, 625–641.
- Zambrano-Zaragoza, M.L., Gutiérrez-Cortez, E., Del Real, A., González-Reza, R.M., Galindo-Pérez, M.J., Quintanar-Guerrero, D. (2014). Fresh-cut Red Delicious apples coating using tocopherol/mucilage nanoemulsion: Effect of coating on polyphenol oxidase and pectin methylesterase activities. *Food Research International*, 62, 974-983.
- Zeeb, B., Mi-Yeon, L., Gibis, M., Weiss, J. (2018). Growth phenomena in biopolymer complexes composed of heated WPI and pectin. *Food Hydrocolloids*, 74, 53-61.
- Zhi, W.W., Wei, T.C., Jen, Y.W., Long, W.H., Lin, C.C., Der, C.J., Kuang, L.M., Tung, L.W. (2018). Comparative study on the physicochemical and functional properties of the

mucilage in the carpel of *Nymphaea odorata* using ultrasonic and classical heating extractions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 117, 1367–1373.