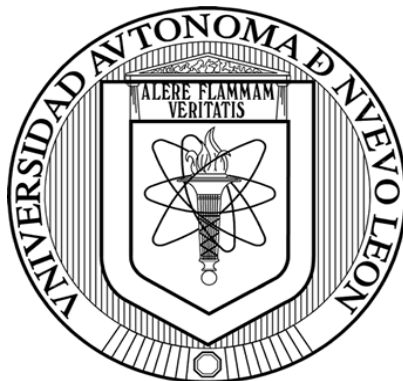


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



**EFFECTO DE LAS MATRICES BIOPOLIMÉRICAS EN LA CINÉTICA DE  
LIBERACIÓN *IN VITRO* DE ANTIOXIDANTES MICROENCAPSULADOS CON  
MEMBRANAS LÍQUIDAS Y SÓLIDAS**

**Por**

**VERÓNICA DE LA CRUZ DE LA CRUZ**

**Como requisito parcial para obtener el Grado de  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ACENTUACIÓN  
EN ALIMENTOS**

**Noviembre, 2018**

**EFFECTO DE LAS MATRICES BIOPOLIMÉRICAS EN LA CINÉTICA DE  
LIBERACIÓN *IN VITRO* DE ANTIOXIDANTES MICROENCAPSULADOS  
CON MEMBRANAS LÍQUIDAS Y SÓLIDAS**

**Comité de Tesis**

---

Dr. Juan Gabriel Báez González  
Presidente

---

Dra. Sandra Loruhamá Castillo Hernández  
Secretario

---

Dr. Carlos Abel Amaya Guerra  
Vocal 1

---

Dra. María Adriana Núñez González Vocal  
Vocal 2

---

Dr. Sergio Arturo Galindo Rodríguez  
Vocal 3

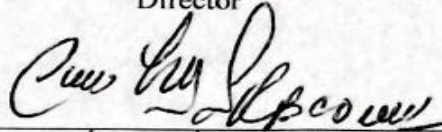
**EFFECTO DE LAS MATRICES BIOPOLIMÉRICAS EN LA CINÉTICA DE  
LIBERACIÓN *IN VITRO* DE ANTIOXIDANTES MICROENCAPSULADOS  
CON MEMBRANAS LÍQUIDAS Y SÓLIDAS**

**Dirección de Tesis**

---

**DR. JUAN GABRIEL BÁEZ GONZÁLEZ**

Director



---

**DRA. LILÍ RODRÍGUEZ BLANCO**

Director Externo

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la fortaleza para salir adelante cada día.

Quiero agradecer con mucho cariño a mis padres el Sr. Juan de la Cruz Olán y Sra. Norma de la Cruz Morales por el apoyo que me han brindado a lo largo de los años. Gracias por enseñarme el valor de una familia, por estar conmigo en las buenas y en las malas; y a pesar de la distancia siempre se preocupan por mí y por tenerme siempre en sus oraciones; los amo con todo mi corazón ya que son la razón de mí existir.

De igual manera a mis hermanos José y Clara, por su cariño, a Carmen y José Alfredo por su afecto que me han demostrado y por aquellos peques que amo tanto, a Jesús Armando, José, Rubí, Ángel Eduardo, y Andrés; para que este trabajo sea un ejemplo de lo que ellos pueden llegar a ser cuando estén en esta etapa de la vida. Y a todos ellos por demostrarme que la distancia no importa cuando la familia está unida fuertemente por lazos de sangre, amistad y amor.

Es para mí la alegría más grande poder terminar esta investigación, más que nada es el haber trabajado, dedicado tiempo y esfuerzo para cumplir este cometido. Pero más que nada es tener la satisfacción de haber trabajado y convivido con muchas personas las cuales hicieron de mi tiempo en el laboratorio y de mis días de estudio menos tediosos. A parte muchos de ellos me dedicaron tiempo y me ayudaron a pensar mejor las cosas.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi asesor, el Dr. Juan Gabriel Báez González que fue la persona que me recibió y guío por este caminar, aunque al principio fue un poco difícil, pero se luchó para poder trabajar en conjunto y sacar adelante esta investigación. Por todo el trabajo que se hizo en el laboratorio y todo lo que aprendí en clases y en la práctica.

Agradezco de igual manera a la Dra. Lili Rodríguez Blanco y a su esposo el Sr. Luis Hernández porque ellos fueron los pioneros de mi formación y quienes me apoyaron y me convencieron de llegar a esta Ciudad de Monterrey NL., a continuar con mis estudios, ya que sin su apoyo no hubiera empezado este caminar, además porque siempre están pendientes de mis padres allá en Tabasco, muchas gracias!

Agradezco con mucho cariño a esas personas que me impulsaron cada día a salir adelante, entre ellos quiero agradecerles a Diana Alejandra, Jenny, Cynthia, Edith, Irasema, por ser las personas que me fortalecieron y que me dieron ánimo en el laboratorio y fuera de él, para seguir adelante cada día. Gracias por esos momentos de alegría, tristeza, así como también de enojos, y por todas y cada una de las aventuras que vivimos en este caminar, espero contar con ustedes por siempre, las quiero mucho.

Mis más sinceros agradecimientos a Ale y a Eduardo, ya que siempre me apoyaron, me aconsejaron, como si fuéramos más que amigos, como hermanos. Ale gracias por hacerme sentir parte de tu familia, porque has estado en todo momento a mi lado, porque compartimos muchos momentos en este caminar, y le agradezco a Dios por haberme permitido conocerte y seguir con esta hermosa amistad.

Agradezco también al Maestro Isidro Guzmán y a la Maestra Irma Díaz Avendaño, por todo el apoyo que me brindaron todo este tiempo, por apoyarme siempre, por los consejos recibidos, por hacerme sentir parte de su familia, muchas gracias.

Agradezco a Minerva Bautista, que me apoyo en el laboratorio, gracias por ser como eres conmigo, por tu amistad incondicional, espero muy pronto vernos y disfrutar de esas pláticas tan amenas que siempre tenemos.

Quiero agradecer a la Lic. Vanesa C. Morado Treviño por todo el apoyo que me ha brindado, por todos esos momentos que hemos pasado, a veces buenos a veces difíciles pero que siempre hemos sobresalido a pesar de todo. De igual manera quiero agradecer a la Maestra Rosa Yolanda Treviño Torres, por su gran calidad humana, por todo el apoyo que me ha brindado, por todas esas oraciones que ha hecho por mí, pero más que nada por su valiosa amistad, por esas palabras correctas y de aliento que siempre me ayudaron a salir adelante en esos momentos tan difíciles, muchas Gracias.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada y al apoyo para el desarrollo de la presente investigación.

## DEDICATORIA

Dedico este esfuerzo de vida a la *Sra. María Morales Guzmán*<sup>†</sup>

¡Porque fue un ejemplo de vida para mí y porque siempre te voy a  
llevar en mi corazón abuelita!

## **ÁREA DE TRABAJO**

La realización del trabajo práctico se llevó a cabo en el Laboratorio de Alimentos del Departamento de Alimentos de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Se realizó una estancia académica en el Cinvestav de Querétaro en el Laboratorio de Biotecnología de la Ciudad de Juriquilla, Querétaro y en el Centro de Investigación de Ciencias Agropecuarias en el Laboratorio de Biotecnología de Alimentos, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, en Villahermosa Tabasco.

## ÍNDICE GENERAL

<b>CONTENIDO</b>	<b>Página</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	i
<b>DEDICATORIAS</b>	iii
<b>ÁREA DE TRABAJO</b>	iv
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	v
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	ix
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	x
<b>ÍNDICE DE ABREVIATURAS</b>	xii
<b>RESUMEN</b>	xiv
<b>ABSTRACT</b>	xv
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>2. ANTECEDENTES</b>	3
2.1 Los carotenoides	3
2.1.1 Tipos de carotenoides	3
2.1.2 Los carotenoides y su aplicación	4
2.2 Cuantificación de carotenoides	6
2.3 Microencapsulación	6
2.3.1 Tipos de microencapsulación	7
2.3.2 Aplicaciones de la microencapsulación	9
2.3.3 Estructura de las microcápsulas	10
2.4 Material de pared	11
2.4.1 Tipos de materiales de pared	11
2.5 Las emulsiones	12
2.5.1 Emulsiones sencillas	13
2.5.2 Elaboración de las cápsulas	14



2.6	Secado por aspersión	16
2.7	Goma Arábica	16
2.7.1	Propiedades de la goma arábica	17
2.8	Goma de mezquite	18
2.9	Almidones	19
2.9.1	Almidón nativo	21
2.9.2	Almidones modificados	21
2.9.3	Almidones modificados por OSA	22
2.9.3.1	Usos y aplicaciones de almidones OSA	22
2.9.4	Almidón de banano	24
2.10	Liberación controlada	25
2.11	Digestión <i>in vitro</i>	26
<b>3.</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b>	27
<b>4.</b>	<b>HIPÓTESIS</b>	28
<b>5.</b>	<b>OBJETIVO</b>	29
5.1	Objetivo general	29
5.2	Objetivos particulares	29
<b>6.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	30
6.1	Materiales	30
6.2	Métodos	30
6.2.1	Obtención del almidón de banano Enano Gigante ( <i>Musa</i> AAA)	30
6.2.2	Solución stock del antioxidante	31
6.2.3	Preparación de la fase acuosa de goma arábica (GA) y goma de mezquite (GM)	31
6.2.3.1	Preparación de la emulsión de aceite en agua enriquecida con carotenoides	31
6.2.4	Modificación del almidón de banano	32
6.2.4.1	Hidrólisis Ácida	32

6.2.4.2	Modificación del almidón por el método OSA (Octenil Succínico Anhídrido)	32
6.2.4.2.1	Preparación de la solución de almidón OSA para las emulsiones	33
6.2.4.2.2	Preparación de las emulsiones con el almidón modificado	33
6.2.4.2.3	Solución stock del antioxidante (Fase Oleosa) de acuerdo al método de Nik et al., 2010.	33
6.2.5	Preparación de emulsiones	33
6.2.6	Digestión <i>in vitro</i>	33
6.2.6.1	Sistema inicial	34
6.2.6.2	Fase de la boca simulada	34
6.2.6.3	Fase estómago simulado	34
6.2.6.4	Fase del intestino delgado simulado	34
6.2.7	Determinación del beta-caroteno después de la digestión <i>in vitro</i>	34
6.2.7.1	Determinación del tamaño de gota	35
6.2.7.2	Microscopía electrónica de barrido (SEM)	35
6.2.7.3	Medición de la estabilidad de almacenamiento Emulsión (Índice de Cremado)	35
6.3	Diseño Experimental	36
7.	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	37
7.1	Obtención del almidón de banano	37
7.2	Emulsiones de Goma Arábica (GA) y Goma de Mezquite (GM)	37
7.2.1	Estabilidad física de las emulsiones de GA	37
7.2.2	Índice de cremado de emulsiones de GA	39
7.2.3	Tasa de coalescencia de emulsiones de GA	41
7.3	Estabilidad física de las emulsiones de GM	41
7.3.1	Índice de cremado de emulsiones de GM	43

7.3.2	Tasa de coalescencia de emulsiones de GM	45
7.4	Estabilidad física de las emulsiones de Almidón de Banano (ABN)	45
7.4.1	Tasa de coalescencia de emulsiones de ABN	47
7.4.2	Comparación del Almidón de Banano Nativo (ABN) y Almidón de Maíz Modificado (AMM)	48
7.4.3	Índice de cremado de las emulsiones preparadas con ABM y AMM	49
7.5	Modificación del Almidón de Banano Nativo por el método de OSA	51
7.5.1	Tamaño de partícula de mulsiones de ABN, ABM y AMM a 25 °C	52
7.5.2	Tamaño de partícula de mulsiones de ABN, ABM y AMM a 90 °C	54
7.6	Digestión <i>in vitro</i> de emulsiones de GA y GM	56
7.7	Caracterización física del almidón modificado	61
7.7.1	Evaluación de la forma y tamaño de los gránulos de almidón por medio de la Microscopía electrónica de barrido (SEM)	61
7.7.2	Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier de almidones nativos y modificados (FT-IR)	64
8.	<b>CONCLUSIONES</b>	66
9.	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	67
10.	<b>RESUMEN BIOGRÁFICO</b>	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
1	Tasa de coalescencia de las formulaciones con GA	41
2	Tasa de coalescencia de las formulaciones de GM	45
3	Tasa de coalescencia de las formulaciones de ABN	47
4	Formulaciones de ABN comparado con el Almidón de maíz	48
5	Formulaciones de ABM, ABN, AMM con diferentes concentraciones de almidón y fase oleosa.	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Paginas
1	Diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) de las emulsiones preparadas con Goma Arábica.	38
2	Diámetro promedio volumétrico ( $D_{4,3}$ ) de las emulsiones preparadas con Goma Arábica.	39
3	Índice de cremado de las emulsiones preparadas con Goma Arábica	40
4	Imagen de las formulaciones observadas que fueron estables (Em_1 y Em_2) e inestables (Em_3 y Em_4)	40
5	Diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) de emulsiones preparadas con GM	42
6	Diámetro promedio volumétrico ( $D_{4,3}$ ) de emulsiones preparadas con GM	43
7	Índice de cremado de las emulsiones preparadas con GM	44
8	Imagen de las formulaciones de GM mostrando visualmente el cremado	44
9	Diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) de emulsiones preparadas con ABN	46
10	Diámetro promedio volumétrico ( $D_{4,3}$ ) de emulsiones con ABN	47
11	Diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) de emulsiones preparadas con ABN	49
12	Índice de cremado de las emulsiones preparadas con ABM y AMM	50
13	Imagen de las formulaciones de ABN y AMM mostrando visualmente el comportamiento de las mismas.	51
14	Diámetro promedio superficial de ABN, ABM y AMM elaboradas a 25 °C	53
15	Diámetro promedio superficial de las emulsiones preparadas	55

	con ABM, ABN y AMM	
16	Digestión <i>in vitro</i> de las emulsiones de GA al 10 y 20 %	57
17	Digestión <i>in vitro</i> de las emulsiones de GA al 10 y 20 %	58
18	Digestión <i>in vitro</i> de las emulsiones de GA, GM y PL	59
19	Digestión <i>in vitro</i> de las emulsiones de ABM, ABN y AMM	60
20	Microfotografías de los gránulos del almidón de banano nativo. 20a): 500X, 20b) 1000X, 20c) 500X.	63
21	Microfotografías de los gránulos del almidón de banano modificado. 21a): 500X y 21b): 1500 X.	64
22	Comparación de los espectros por FT-IR de ABN y ABM	65

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Figura	Descripción
ABM	Almidón de banano modificado
ABN	Almidón de banano nativo
ANOVA	Análisis de varianza
Cm	Centímetros
D	Diámetro promedio
Da	Daltons
Em	Emulsión
FTIR	Espectrofotometría de infrarrojo por transformadas de Fourier
g	Gramos
GA	Goma arábica
GM	Goma mezquite
KCl	Cloruro de potasio
h	Hora
J	Joule
mL	Mililitros
NaCl	Cloruro de sodio
NaN <sub>3</sub>	Azida de sodio
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Fosfato de sodio monobásico
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	Fosfato de sodio dibásico
OSA	Anhidro octenil succínico
OH	Grupo hidroxilo
PL	Proteína de leche
rpm	Revoluciones por minuto
SEM	Microscopía electrónica de barrido
USA	Estados Unidos de América
W/O	Emulsiones agua/aceite

°C	Grados Celsius
%	Porcentaje
μm	Micrómetros
φ	fracción volumétrica de la fase dispersa



## RESUMEN

Hoy en día el creciente empleo de antioxidantes en la industria de alimentos hace necesaria la búsqueda de nuevas alternativas para reducir la inestabilidad y prolongar la vida útil de estos compuestos ( $\beta$ -carotenos, polifenoles, antocianinas, etc.), entre dichas estrategias se encuentra la técnica de microencapsulación. Para ello, se ha intensificado la búsqueda de polímeros más apropiados y específicos, con propiedades de liberación controladas para facilitar la incorporación antioxidante como aditivos alimentarios ya que el consumo de dichos compuestos proveen efectos benéficos a la salud (ej. prevención de enfermedades degenerativas). El objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto de los diferentes biopolímeros en la cinética de liberación *in vitro* y en la degradación de los carotenoides microencapsulados en matrices líquidas y sólidas. De acuerdo a los objetivos planteados, se elaboraron emulsiones agua en aceite (W/O), con las diferentes matrices biopoliméricas como goma arábica (GA), goma de mezquite (GM), almidón de banano nativo (ABN) y almidón de banano modificado (ABM) y sus posibles combinaciones, las microcápsulas fueron obtenidas por el método de secado por aspersión. Se determinó la estabilidad física de las emulsiones con el diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ), índice de cremado y tasa de coalescencia. Además, se cuantificó la liberación del activo en las emulsiones y microcápsulas (*in vitro*) simulando las condiciones gástricas. Las emulsiones de GA y GM con una concentración de 20 % con una fase oleosa ( $\phi$ ) 0.1 y  $\phi$  0.2 fueron más estables con  $D_{3,2}$  de  $1.07\mu$ , así también con el índice de cremado y la tasa de coalescencia. Las emulsiones con ABN fueron muy inestables, por lo tanto, se realizó una modificación del ABN con anhídrido octenil succínico (OSA). Las emulsiones con ABM a  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  con una concentración de 5.4 % y  $\phi$  de 0.1, fueron estables confirmando con el tamaño de partícula, índice de cremado y tasa de coalescencia. En relación a la digestión *in vitro* de GA y GM se encontró que la emulsión con GA al 10% mostró mejor liberación del  $\beta$ -caroteno. Con el ABM y ABN de acuerdo al diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ), el ABM presentó un tamaño de partícula de  $1.17\mu$  en el intestino delgado. A las microcápsulas se determinó Microscopía electrónica de barrido (SEM), Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR).

## ABSTRACT

Nowadays, the growing use of antioxidants agents in the food industry makes it necessary to search for new alternatives to reduce the instability and prolong the useful life of these compounds ( $\beta$ -carotenes, polyphenols, anthocyanins, etc.), among these strategies is the microencapsulation technique. Thus, the search for more appropriate and specific polymers has been intensified, with controlled release properties to facilitate the incorporation of antioxidants agents as food additives since the consumption of these compounds provides beneficial effects to health (e.g. prevention of degenerative diseases). The aim of this research was to determine the effect of different biopolymers *in vitro* release kinetics and degradation of carotenoids microencapsulated in liquid and solid matrices. According to the proposed objectives, water-in-oil (W/O) emulsions were elaborated, with the different biopolymer matrices such as gum arabic (GA), gum mesquite (GM), native banana starch (ABN) and modified banana starch (ABM) and their possible combinations, the microcapsules were obtained by spray drying method. Also, it was determined the physical stability of emulsions with the surface diameter ( $D_{3,2}$ ), cremated index and rate of coalescence. In addition, the release of active compound in the emulsions and microcapsules was quantified *in vitro*, simulating the gastric conditions. The emulsions of GA and GM with a concentration of 20% with an oil phase ( $\phi$ ) 0.1 and  $\phi$  0.2 were more stable with  $D_{3,2}$  of  $1.07\mu$ , as well as with the cremation index and the coalescence rate. The emulsions with ABN were very unstable; therefore, a modification of the ABN was realized with octenyl succinic anhydride (OSA). The emulsions with ABM at  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  with a concentration of 5.4% and  $\phi$  of 0.1, were stable and this was confirmed with the particle size, cremation index and coalescence rate. Regarding to GA and GM *in vitro* digestion it was found that the emulsion with 10% GA showed better release of B-carotene. Respect to ABM and ABN, according to the average surface diameter ( $D_{3,2}$ ), ABM presented a particle size of  $1.17\mu$  in the small intestine. Finally, microscopic scanning electron microscopy (SEM), infrared spectroscopy with Fourier transform (FT-IR) was determined to the microcapsules.

## 1. INTRODUCCIÓN

El concepto de microencapsulación se deriva de la idealización del modelo de la célula, en la que se envuelve el núcleo en una membrana semipermeable que lo protege del medio exterior, mientras que también controla la entrada y salida de sustancias en la célula. Del mismo modo, la microencapsulación, está constituida por una fase interna (fase activa) y el material que la recubre es llamado material de pared y generalmente no reacciona con el material a encapsular (Zuidam y Shimoni, 2010), actúa como una película de protección, aislando sustancias activas y evitando los efectos de su exposición inadecuada (Aguilar, 2012); puede ser puro (homogéneo) o una mezcla (heterogéneo) dependiendo de la utilización (Kandansamy y Somasundaram, 2012). Se ha utilizado con éxito en la industria de los alimentos para proteger sustancias que son sensibles a diversos factores que causan su deterioro, para reducir la tasa de transferencia desde el núcleo al medio en el que se encuentra y para modificar las características físicas del material, lo que facilita la manipulación (Desai y Park, 2005).

Hoy en día se aplica para preservar y/o proteger numerosos compuestos, como los pigmentos, estos se dividen en ocho categorías: clorofilas, antocianinas, flavonoides, betalainas, taninos, mioglobina, hemoglobina y carotenoides (Kandansamy y Somasundaram, 2012). Los carotenoides son una familia de compuestos pigmentados que son sintetizados por plantas y microorganismos, brindando propiedades benéficas y prevención de enfermedades cardiovasculares, cáncer y otras enfermedades crónicas (Latha y Jeevaratnam, 2010). Además, representan una fuente de provitamina A, no son tóxicos y brindan a la célula actividad antioxidante, participando en la desactivación de radicales libres producidos en el metabolismo celular, son solubles en lípidos y se extraen fácilmente con solventes no polares, son sensibles a la luz y al oxígeno, además, su degradación se acelera por los radicales libres que se forman en la oxidación lipídica.

En la actualidad, se busca el desarrollo de nuevos sistemas de protección y liberación, que permitan disminuir la degradación y controlar la liberación de los principios activos. La modificación de la superficie de las microcápsulas, así como la incorporación de grupos funcionales permite dirigir los activos de forma intacta hacia el sitio de acción y la factibilidad de obtener preparados con diferente carga superficial,

tamaño y fluidez en dependencia del objetivo deseado, presentando una cinética de liberación del activo con buenas características. Con estos sistemas se han abierto nuevas oportunidades para la inmovilización de activos y su utilización en el área de alimentos, cosmética, así como también, en la biomedicina para el diagnóstico y terapéutica de diversas enfermedades (Parra, 2010).

Los polímeros naturales o sintéticos tales como almidones, maltodextrinas, lípidos, proteína animal y vegetal, goma arábiga, quitosano, entre otros, han sido ampliamente utilizados como aditivos en la industria alimentaria, en la industria farmacéutica, cosméticos y en agricultura, entre otras áreas. Entre las principales razones para la selección de una buena materia prima se encuentran las relacionadas a su costo, facilidad de obtención, aspectos de calidad, pureza, propiedades mecánicas, baja toxicidad, degradación en el medio ambiente y compatibilidad con otras sustancias (Murúa et al., 2009). Es necesario utilizar técnicas en las cuales se utilice este biopolímero como material de pared, una de ellas es la de elaborar emulsiones como las de aceite en agua, ya que son vehículos ideales para la liberación de moléculas bioactivas en productos acuosos que ofrecen la protección de las moléculas encapsuladas.

En este contexto, esta investigación tiene como objetivo, determinar el efecto de diferentes matrices biopoliméricas en las cinéticas de liberación *in vitro* y en la degradación de los carotenoides microencapsulados en matrices líquidas y sólidas.

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1 Los carotenoides**

El mundo moderno tiene que buscar nuevas fuentes de sustancias que podrían influir en los lípidos y en la estabilidad de los alimentos, que sean inocuas para los consumidores y además que exhiban alta actividad antioxidante cuando se incorporen en los alimentos (Michalowska y Stachowiak, 2010). Los carotenoides son componentes que juegan un papel importante en los sistemas biológicos, comenzando con la protección contra la luz, mejoramiento inmunológico, la protección contra los agentes cancerígenos y actividad antioxidante, además de ser precursores de la vitamina A (Sikora et al., 2008). Estos compuestos son biosintetizados por algunas bacterias, algas, hongos, y plantas, sin embargo los animales lo deben obtenerlos de su alimento (verduras, frutas, cereales, etc.). Existen también carotenoides producidos por microorganismos como; el licopeno,  $\beta$ -caroteno, astaxantina, luteína, zeaxantina,  $\beta$ -criptoxantina y anthaxantina. El licopeno, luteína, zeaxantina y  $\beta$ -criptoxantina,  $\alpha$ -caroteno,  $\beta$ -caroteno, son los más abundantes en el plasma humano (Aizawa y Inakuma, 2007).

#### **2.1.1 Tipos de carotenoides**

Hay muchos carotenoides aplicados ampliamente en la industria farmacéutica, alimentaria y cosmética. El mercado mundial de los aditivos alimentarios se basa principalmente en aditivos sintéticos, sin embargo, una mayor conciencia de los consumidores se ha traducido en un aumento del uso de sustancias naturales (Pokorny, 2007).

Los carotenoides son los pigmentos de más amplia distribución en los organismos fotosintéticos (Fraser y Bramley, 2004). Actúan como fotoprotectores y pigmentos accesorios en la fotosíntesis, y desempeñan un papel importante en la atracción de los polinizadores y la dispersión de semillas. Estos compuestos, otorgan tonalidades amarillas, naranjas y rojas a los alimentos y pueden encontrarse en dos formas: los carotenos y las xantofilas. Los carotenos, tienen únicamente hidrógeno y carbono en su estructura química, como el  $\beta$ -caroteno; mientras que las xantofilas

presentan hidrógeno, carbono y oxígeno, como la zeaxantina. Estos pigmentos, se encuentra en frutas y verduras, algunos hongos y algas (Janiszewska, 2017).

### **2.1.2 Los carotenoides y su aplicación**

En estudios epidemiológicos recientes se ha demostrado una asociación entre niveles elevados de carotenoides en la dieta o en sangre y un efecto protector contra el desarrollo de enfermedades crónicas como ciertos tipos de cáncer, enfermedades cardiovasculares, enfermedades degenerativas de la mácula y cataratas, entre otras (Shen *et al.*, 2014). Cuando estas enfermedades no son tratadas a tiempo, pueden causar parcial o total ceguera. Además, estos compuestos tienen una influencia en la comunicación interneuronal del ojo con el cerebro, aumentando sus propiedades funcionales (Bernstein *et al.*, 2015). Asimismo, fortalecen el sistema inmune ante ataques de infecciones y contribuyen al buen funcionamiento del sistema reproductivo (Janiszewska, 2017). Además, en estudios *in vivo* e *in vitro* han mostrado que el papel foto protector de los carotenoides está relacionado a su actividad antioxidante.

Por otro lado, se ha establecido que la estructura de los carotenoides tiene una gran influencia en su actividad antioxidante; por ejemplo, la cantaxantina y la astaxantina muestran mejor actividad antioxidante que el  $\beta$ -caroteno y la zeaxantina. No obstante, la actividad antioxidante depende también del sistema en el que se utilicen o se encuentren (Delgado y Paredes, 2003).

Los carotenoides, se caracterizan por ser poco solubles en agua (liposolubles), lo que fomenta su uso como colorantes en emulsiones o medios oleosos. En general, estos pigmentos naturales, se usan para alimentos con alto contenido graso como margarinas, tortas y productos lácteos. Algunos de ellos son el licopeno, el  $\beta$ -caroteno, la zeaxantina, y el fitoeno, los cuales son una excelente opción para el reemplazo de colorantes artificiales. La formulación de los pigmentos, está ligada a su concentración en los alimentos, es decir que, a menor cantidad de carotenoides empleada, los tonos proporcionados al alimento serán amarillos, pero a mayor cantidad, los tonos serán rojizos (Shen, 2014). En la naturaleza se han descubierto más de 160 carotenoides, con el  $\beta$ -caroteno como el compuesto más abundante. Estos compuestos se encuentran disponibles en las algas, zanahorias, aceite de palma o por producción de

microorganismos durante procesos de fermentación, entre otras fuentes (Chapman, 2011).

Desafortunadamente los carotenoides son compuestos termolábiles y susceptibles a la oxidación, por lo tanto, se busca una protección que les brinde mayor estabilidad frente a cambios de temperatura, pH, luz, humedad, oxidación y radiación (Chen, 2017). En su forma natural, son insolubles en agua y ligeramente solubles en aceite a temperatura ambiente. La aplicación de los carotenoides en los alimentos para dar color, no se realiza a partir de los pigmentos purificados; pero las preparaciones de carotenoides naturales solubles en agua, es muy amplio e incluye su uso en bebidas, helados, postres, dulces, sopas, productos cárnicos, alimentos para mascotas y acuicultura, entre otros (Delgado y Paredes, 2003). Durante el procesamiento de los alimentos, las operaciones como el secado generan la degradación de los carotenoides, provocando una pérdida en su actividad. Por ejemplo, en el secado de la pulpa de mango mediante aire caliente (80 °C), se descompone el 20% (p/p) de los carotenoides totales y a temperaturas de 95 °C, se descomponen hasta el 35% de los mismos (Tortoe *et al.*, 2013). Estas preparaciones deben tener buena estabilidad contra la oxidación, la isomerización, poseer propiedades adecuadas de solubilidad.

Existen algunos carotenoides que son antioxidantes solubles en lípidos como la vitamina E, mientras que los polifenoles de las plantas, especialmente sus glicósidos, son antioxidantes solubles en agua. Otros grupos de antioxidantes también son componentes importantes de la dieta. La interacción entre los antioxidantes ha sido cada vez más reconocido como importante para el efecto protector contra el estrés oxidativo tanto en los alimentos (procesamiento y el almacenamiento), en el tracto digestivo (durante la digestión de los alimentos) y después de la posible absorción de los fluidos y tejidos en el cuerpo (Skibsted, 2012).

Sin embargo, los carotenoides pueden llegar a presentar cierta estabilidad ante cambios de pH y durante los procesos de calentamiento, de esterilización y de congelación (Janiszewska, 2009). Un adecuado proceso de secado (en frío), como la liofilización, permite que los compuestos bioactivos no se degraden y aumenten su concentración en base seca, por ende, no se altera su capacidad antioxidante (Morais *et al.*, 2015). A nivel industrial, estos pigmentos se pueden encontrar como suspensiones,

extractos, soluciones acuosas, emulsiones o productos coloidales, que son empleados según la matriz final (Kläui y Bauernfeind, 1981). Su aplicación puede ser directa o indirecta, dependiendo de la complejidad de la matriz alimentaria y la calidad del aditivo alimentario.

## **2.2 Cuantificación de carotenoides**

Los carotenoides se cuantifican por medio de la relación absorbancia-concentración de un patrón conocido, como puede ser el  $\beta$ -caroteno utilizando espectroscopia UV-VIS. Una curva de calibración permite conocer las cantidades de cada compuesto y establecer su concentración en la muestra de análisis (Rodríguez y Kimura, 2004). Las concentraciones de carotenoides mayores a 20 ppm, indican que la muestra es buena fuente de estos bioactivos, concentraciones entre 5 ppm y 20 ppm indican que la muestra posee buenos niveles de carotenoides, mientras que concentraciones por debajo de 5 ppm indican que la muestra es carente de estos compuestos (Giuffrida *et al.*, 2011).

## **2.3 Microencapsulación**

La microencapsulación hoy en día se aplica para proteger y/o preservar diferentes compuestos, por lo tanto, esta técnica que se define como un proceso de confinamiento de compuestos activos dentro de una matriz o membrana en forma de partículas para conseguir uno o más efectos deseables, entre los cuales destacan; la liberación controlada, extensión de la vida útil, separación de compuestos incompatibles y mejoramiento las cualidades del producto final (Eng et al., 2010). Dicha técnica se ha utilizado con éxito en la industria de los alimentos para proteger sustancias que son sensibles a la temperatura, la luz, el oxígeno y la humedad, así como también, para reducir la tasa de transferencia desde el núcleo al medio en el que se encuentra el producto y para modificar las características físicas del material, lo que facilita la manipulación (Caló y Khutoryanskiy, 2015).

En un sentido amplio, la tecnología de encapsulación en el procesamiento de alimentos incluye el recubrimiento de partículas diminutas de diversos compuestos entre los que destacan algunos colorantes, acidulantes, grasas, aromas, entre muchos otros.



Dicha tecnología permite proteger la pérdida de componentes y cambios indeseables en los materiales, además, permite liberar controladamente algunos principios activos termolábiles de gran valor agregado, así como de otros componentes con actividad e interés biológico. Otra de las funciones de la encapsulación es desarrollar envolturas que proporcionen un medio para envasar, separar y almacenar compuestos a escala microscópica, con la finalidad de mejorar su desempeño e incrementar su funcionalidad (Desai y Park, 2005), mediante la inhibición o reducción de la degradación térmica y la retención de componentes bioactivos tales como los carotenoides (Sutter et al., 2007; Kha, 2010) y el limoneno (Kaushik y Ross, 2007), algunos sabores (Busso et al., 2007) y lípidos, entre otros (Gharsallaoui et al., 2007).

Las microcápsulas tienen la capacidad de preservar una sustancia en estado finamente dividido y para liberarlo según se requiera, estas microcápsulas pueden variar desde tamaños submicrométricos hasta milimétricos y poseen una gran diversidad de formas, dependiendo de los materiales y métodos utilizados para su elaboración (Desai y Park, 2005). Su uso se emplea para preservar la bioactividad de diversos componentes durante el procesamiento, almacenamiento y liberación. Entre algunos usos de la microencapsulación destacan; la encapsulación de aceite de pescado con la finalidad de incrementar la ingesta de ácidos grasos poliinsaturados n-3, encapsulación de bacterias probióticas en productos lácteos congelados y para mantener componentes de olores y sabores durante el almacenamiento (Kaushik et al., 2014).

### **2.3.1 Tipos de microencapsulación**

La selección del método de microencapsulación estará en función de las propiedades del material a encapsular, los costos, el tamaño deseado de las microcápsulas, la aplicación y los mecanismos de liberación. Para que se lleven a cabo estos aspectos, se requiere de una buena estabilización estérica, que puede conseguirse mediante un polímero compuesto de una pequeña fracción de segmentos hidrofóbicos fuertemente adsorbentes y una gran fracción de segmentos hidrofílicos no adsorbentes, combinada con una estabilización electrostática que suministra una barrera energética repulsiva que previene que un par de gotas se peguen fuertemente a separaciones

pequeñas bajo la influencia de fuerzas de atracción de Vander Waals (Vernon et al., 1996).

La encapsulación se puede realizar de diferentes formas, por ejemplo; como un recubrimiento de membrana simple, una pared o membrana de forma esférica o irregular, una estructura de paredes múltiples (con paredes de las mismas o diferente composición) o con numerosos núcleos dentro de la misma estructura de pared. En la actualidad, casi cualquier material puede ser encapsulado con el propósito de aislamiento, purificación o de liberación lenta. Las aplicaciones de la encapsulación han sido lentas, pero con constante aumento, lo anterior debido a que se pensaba que la técnica era demasiado costosa y muy específica. Sin embargo, los volúmenes de producción han aumentado y las técnicas de preparación y los materiales se han ido desarrollando, por lo tanto, el número de productos alimenticios encapsulados ha aumentado significativamente (Gibbs y Kermasha, 1999). La microencapsulación hoy en día se aplica para proteger numerosos compuestos o componentes comerciales, nutracéuticos y algunos pigmentos, tales como clorofilas, antocianinas, flavonoides, betalainas, taninos, mioglobina, hemoglobina y carotenoides, entre muchos otros (Kandansamy y Somasundaram, 2012).

El material que se encuentra encapsulando puede ser denominado como agente encapsulante, cobertura, membrana, cáscara, material transportador, material de pared, fase externa y puede estar compuesto de uno o varios materiales (Balasubramani et al., 2013; Kaushik et al., 2015) siempre y cuando sea capaz de formar una barrera entre el ingrediente activo y el ambiente externo (Estevinho, 2013; Gallardo et al., 2013; Nesterenko et al., 2013; Zuidam y Nedovic, 2010).

Por otro lado, el material a encapsular suele ser denominado de diversas maneras, tales como núcleo, ingrediente activo, fase interna, entre otros (Kaushik, 2015; Zuidam y Nedovic, 2010) y puede estar compuesto por uno o más ingredientes de interés (Balasubramani et al., 2013). La retención del ingrediente activo dentro de la microcápsula depende de su funcionalidad química, solubilidad, polaridad y volatilidad, entre otros (Gharsallaoui et al., 2007).

### **2.3.2 Aplicaciones de la microencapsulación**

La tecnología de encapsulación ha sido utilizada en la industria de los alimentos por más de 60 años como alternativa para proveer ingredientes líquidos o sólidos con una barrera efectiva a las interacciones químicas y/o ambientales hasta el momento apropiado para su liberación (Carvalho y Hubinger, 2014; Desai y Park, 2005). De esta manera, permite aumentar la efectividad de muchos compuestos en la industria, mejorando u otorgando nuevas funcionalidades (Estevinho, 2013).

La aplicación de la microencapsulación en la industria se sustenta en sus diversas ventajas entre las cuales destacan:

- Separar y proteger al ingrediente activo de la degradación mediante la reducción de su reactividad con el medio que lo rodea (por ejemplo: calor, humedad, luz y aire).
- Modificar las características físicas del ingrediente activo y facilitar su manipulación.
- Adaptar el producto y regular su velocidad de transferencia hacia el exterior, para que se comporte como un sistema de liberación lenta o controlada en el tiempo.
- Enmascarar el sabor del ingrediente activo.
- Diluir el ingrediente activo, cuando sólo se requiere en muy pequeñas cantidades y aun así alcanzar una dispersión uniforme en el agente encapsulante (Desai y Park, 2005; Estevinho, 2013; Jyothi, 2010; Kha et al., 2014; Nesterenko et al., 2013; Ré, 1998; Sarkar y Singhal, 2011).

En efecto, casi cualquier material que necesite ser protegido, aislado, liberado lento o controladamente en el tiempo puede ser encapsulado. Entre los ingredientes alimenticios que pueden ser beneficiados por la encapsulación cabe mencionar: aromas, ácidos, bases, buffers, lípidos, enzimas, microorganismos, edulcorantes artificiales, vitaminas, minerales, preservantes, antioxidantes, agentes entrecruzantes, agentes de fermentación, colorantes y nutrientes (Barbosa et al., 2005). Más aún, esta tecnología

tiene diferentes aplicaciones no sólo en la industria alimentaria sino también en el área biomédica, farmacéutica, cosmética, agricultura y catálisis, entre otras (Nesterenko et al., 2013), siendo las áreas de aplicación más abordadas la farmacéutica, química, bioquímica e ingeniería química. Así mismo, las aplicaciones de microencapsulación han tenido un incremento exponencial en las últimas décadas. En este sentido, un análisis de las publicaciones concernientes a la técnica de microencapsulación indica un total de casi 9300 artículos publicados desde 1960, de los cuales alrededor de 3200 fueron publicados en los últimos 5 años (Estevinho, 2013).

### **2.3.3 Estructura de las microcápsulas**

Este término se interpreta ampliamente para incluir microcápsulas, micropartículas, nanocápsulas, etc. En su mayoría son esferas pequeñas, sin embargo, su tamaño y forma dependen de los materiales y los métodos utilizados para su elaboración (Estevinho, 2013; Gharsallaoui et al., 2007).

De acuerdo a la distribución del ingrediente activo en el sistema, se distinguen distintos tipos de microcápsulas (Desai y Park, 2005; Ré, 1998). La estructura más simple es aquella en que un núcleo de ingrediente activo (esférico o no) es rodeado por una pared o membrana de espesor uniforme del agente encapsulante (Desai y Park, 2005; Gibbs, 1999). Esta estructura de microcápsula se denomina estructura partícula simple. También se pueden formar estructuras multicapas que consisten de múltiples paredes de diferente composición rodeando a un único núcleo (Estevinho, 2013) o bien estructuras multinúcleos que contienen numerosos activos en el interior de una única pared, también conocidas como agregados (Calvo et al., 2010). Por otro lado, se pueden formar estructuras tipo matriz; las cuales comprenden aquellas partículas en que el núcleo se encuentra disperso uniformemente a través de todo el agente encapsulante (Gharsallaoui et al., 2007).

Algunas propiedades de las microcápsulas, tales como composición, mecanismo de liberación, tamaño y forma, se pueden modificar según la aplicación específica del ingrediente activo. En efecto, las microcápsulas son formuladas para que el núcleo sea liberado de una manera rápida o bien controlada (Ré, 1998). La liberación del núcleo contenido en la microcápsula a una velocidad controlada puede ser desencadenada

mediante agitación, disolución, difusión, calentamiento, acción de enzimas o pH, entre otros (Nesterenko et al., 2013).

## **2.4 Material de pared**

### **2.4.1 Tipos de materiales de pared**

Los principales materiales encapsulantes utilizados son carbohidratos (almidón y derivados, maltodextrinas, jarabes de maíz, sacarosa, dextrana, ciclodextrinas, carboximetilcelulosa, metilcelulosa, etilcelulosa, nitrocelulosa, acetilcelulosa, etc.); gomas (arábiga, mezquite, guar, alginato de sodio, carragenina, etc.); lípidos (ceras, parafinas, grasas, ácido esteárico, tristearina, mono y diglicéridos) y proteínas (gelatina, proteína de soya, caseinatos, suero de leche, zeína, gluten, caseína, etc.). Estos agentes encapsulantes deben de tener la capacidad de proporcionar una emulsión estable durante el proceso de secado por aspersion y tener muy buenas propiedades de formación de película para proveer una capa que proteja al ingrediente activo de la oxidación (Desai y Park, 2005).

Hay un número de recubrimientos disponibles y aprobados comercialmente para producir diversos alimentos microencapsulados. No todos los materiales de protección satisfacen todas las propiedades, en ocasiones es necesario utilizarlos en combinación con otros materiales de revestimiento o con diversos agentes (eliminadores de oxígeno, antioxidantes, agentes quelantes y tensioactivos, entre otros; Ré, 1998) para incrementar su efectividad. Las proteínas y los polisacáridos son dos de los biopolímeros funcionales más importantes añadidos en los productos alimenticios basados en emulsión con la finalidad mejorar su estabilidad, textura, tiempo de conservación y apariencia general. La proteína de suero (WPI por sus siglas en inglés) es un excelente emulsionante y ampliamente utilizado en el área de alimentos debido a sus propiedades de superficie activa. WPI es adsorbida en la interface aceite-agua para formar una película protectora y proporcionar soporte estructural para las gotitas de aceite a través de una combinación de interacciones electrostáticas y estéricas (Changhui y Gunasekaran, 2009). Sin embargo, la mayoría de los estudios se han enfocado en el uso de maltodextrina y goma arábica como agentes encapsulantes. Existen pocos estudios con materiales como la proteína de suero de leche, lactosa, lecitina de soya, caseinato de sodio (Hong et al.,

2012), gelatina y sacarosa, entre otros (Shu et al., 2006) con un impacto significativo en la encapsulación de compuestos bioactivos (Sun-Waterhouse, 2012). Estudios recientes, muestran el empleo de fibras como agentes acarreadores (la inulina se ha utilizado como auxiliar en el secado por aspersión de extractos para incrementar el uso y el consumo de fibra; Sáenz et al., 2009).

Debido a que los carotenoides son sensibles a ciertos factores fisicoquímicos y ambientales, se han buscado alternativas para protegerlos. Una manera de lograrlo, es mediante el uso de emulsiones sencillas de agua en aceite (W/O).

## **2.5 Las emulsiones**

El campo de las emulsiones alimenticias ha sido ampliamente abordado en los últimos años, dando lugar a una gran diversidad de productos con distintas características estructurales y un comportamiento viscoelástico marcadamente diferente. Las emulsiones aceite en agua (o/w) se utilizan en numerosos procesos industriales y son la base de muchos productos alimenticios. Las emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables y cuando el contenido lipídico es reducido esta inestabilidad se hace mayor. Esto hace imprescindible el agregado de emulsificantes y/o espesantes para volverlas cinéticamente estables. La elaboración de emulsiones con bajo contenido lipídico es una de las áreas en desarrollo donde se busca generar sistemas estables, con las características reológicas deseadas, a partir de un porcentaje de aceite reducido. El agregado de hidrocoloides como espesante o gelificante de la fase acuosa en este tipo de emulsiones resulta una interesante alternativa para el incremento de su estabilidad basado en la disminución de la velocidad de cremado, a partir de un aumento en la viscosidad de la fase continua (Lorenzo et al., 2017).

Otra ventaja es que el incremento de la viscosidad del producto es percibido por los consumidores como un aumento en la calidad del mismo. Sin embargo, estos polisacáridos se deben agregar con precaución ya que también pueden afectar las interacciones coloidales presentes en la emulsión y provocar que la emulsión flocule, lo que podría llevar a su vez a que aumente la velocidad de cremado. Uno de los atributos de calidad más relevantes en un alimento, en particular en una emulsión, es la percepción por parte del consumidor (ej. buena textura). La reducción del contenido

lipídico genera una pérdida de la cremosidad y una menor aceptabilidad en el mercado de estos productos. Por lo tanto, es necesario encontrar componentes que reflejen las cualidades deseadas por el consumidor, manteniendo un bajo contenido de aceite y un sistema estable durante el tiempo (Lorenzo et al., 2017).

### **2.5.1 Emulsiones sencillas**

Las emulsiones se clasifican en términos de la ubicación relativa de las fases oleosa y agua dentro del sistema. Un sistema que se compone de partículas de aceite dispersadas en una fase acuosa es referido como aceite en agua (O/W). En la industria alimentaria las emulsiones O/W están tipificados principalmente por leche, mayonesas y aderezos. Además, tales sistemas pueden ser utilizados como ingredientes que participan en la formación de estructuras de productos más complejos. Algunos ejemplos son el yogurt u otros sistemas gelificados que contienen gotitas de emulsión que deben interactuar con otro ingrediente alimentario, pero que no se desestabiliza en el proceso (Bortnowska, 2011). La emulsión aceite en agua exhiben todos los comportamientos clásicos de coloides metaestables y su estabilidad cinética y termodinámica depende en gran medida de la capa adsorbida en la interface aceite-agua. El emulsionante utilizado en la industria alimentaria puede dividirse en pequeñas moléculas anfifílicas, por ejemplo, surfactantes polisorbatos, monoacilglicerol, diacilgliceroles y lecitina, con masas moleculares en el intervalo de 500-1300 Da y grandes moléculas tensoactivas, tales como proteínas, que tienen masas moleculares de decenas de kilodaltons (Capek, 2004).

Hay una serie de características deseables de los sistemas de liberación, los cuales involucra si el sistema es comestible, si es el adecuado para su utilización por las industrias de alimentos y otros. Algunos de los atributos más importantes es la calidad alimentaria, por lo tanto, este sistema debe ser desarrollado a partir de ingredientes alimentarios permitidos, utilizando procesos aprobados. Algunos de los más comunes es el de los ingredientes de grado alimenticio que se pueden utilizar para los sistemas a base de emulsiones, estos sistemas deben de ser fabricados a partir de ingredientes de bajo costo. Algunos de los beneficios obtenidos de la encapsulación de lípidos bioactivos en los sistemas de liberación es que deben de proteger a los lípidos bioactivos

encapsulado contra alguna forma de degradación química, por ejemplo, la oxidación y la hidrólisis. Idealmente, un sistema de liberación debe ser capaz de encapsular una cantidad relativamente grande de lípidos bioactivos por unidad de masa de material de soporte, de manera eficiente y debe retener el componente encapsulado hasta que sea liberado en un determinado sitio de acción, a una velocidad controlada, o en respuesta a un estímulo ambiental específico (por ejemplo, pH, fuerza iónica, actividad enzimática, o la temperatura), y debe ser compatible con la matriz alimentaria que lo rodea, es decir, que no debe afectar negativamente la apariencia, textura, sabor o la estabilidad del producto final y deberá aumentar (o al menos no afectar negativamente) la biodisponibilidad/bioactividad del componente encapsulado (McClements et al., 2007).

### **2.5.2 Elaboración de las cápsulas**

Aunque la tecnología de encapsulación es la más desarrollada en el ámbito de los sistemas de suministro de fármacos, también ha revolucionado la industria de alimentos. La microencapsulación, permite la posibilidad de proteger al producto contra la oxidación, fotosensibilidad, volatilidad y en algunos casos muy importantes ayuda a la reducción de la acción irritante gastrointestinal de algunos activos (Calero et al., 2008).

La encapsulación se puede definir como una técnica por la cual gotas líquidas o partículas sólidas o gaseosas son cubiertas con una película polimérica porosa conteniendo una sustancia activa (Araneda y Valenzuela, 2009). La estructura formada por el agente microencapsulante alrededor de la sustancia microencapsulada es llamada pared, esta protege el núcleo contra el deterioro y la liberación bajo condiciones deseadas (Parra, 2010), esta membrana, barrera o película está generalmente elaborada por componentes con cadenas para crear una red con propiedades hidrofóbicas y/o hidrofílicas (Fuchset al., 2006).

La encapsulación, es un proceso mediante el cual ciertas sustancias bioactivas (sabores, vitaminas o aceites esenciales) son introducidas en una matriz o sistema pared con el objetivo de impedir su pérdida, para protegerlos de la reacción con otros compuestos presentes en el alimento o para impedir que sufran reacciones de oxidación debido a la luz o al oxígeno. Una ventaja adicional es que un compuesto encapsulado se liberará gradualmente del compuesto que lo ha englobado o atrapado y se obtienen



productos alimenticios con mejores características sensoriales y nutricionales (Yañez et al., 2002).

Las cápsulas finales en el proceso de encapsulación pueden cambiar su denominación en función de sus tamaños de partícula. Partículas encapsuladas son llamados microcápsulas cuando el rango de tamaño es entre 0.2 y 5,000 micrómetros, macrocápsulas cuando el rango es mayor de 5,000 micrómetros y nanocápsulas cuando el rango es inferior a 0.2 micrómetros (King, 1995). El método más utilizado para obtener encapsulados es aquel que da como resultado la formación espontánea de nanopartículas de tamaño más pequeño con carga positiva sin utilizar ningún disolvente orgánico. El principal inconveniente es que bajo condiciones adversas de pH bajo y/o alto, puede haber desintegración de las partículas debido a la interacción débil entre los polifenoles y el polímero (Dudhani y Kosaraju, 2010).

Respecto al área de alimentos, las aplicaciones de esta técnica se han ido incrementando debido a la protección de los materiales encapsulados de factores como calor y humedad, permitiendo mantener su estabilidad y viabilidad. Las microcápsulas ayudan a que los materiales alimenticios empleados resistan las condiciones de procesamiento y/o empaque mejorando características como el sabor, aroma, estabilidad, valor nutritivo y apariencia de sus productos, entre otras (Montes et al., 2007).

Existen diversas técnicas para encapsular compuestos activos, la selección del método está en función del presupuesto, los costos, las propiedades del material a encapsular, el tamaño deseado de las microcápsulas y los mecanismos de liberación. En general, algunas características importantes a tener en cuenta en la elaboración de las cápsulas son; la formación de la pared alrededor del material, asegurar no se produzcan escapes y garantizar que materiales no deseados se mantengan fuera del mismo. Para ello se utilizan técnicas especiales como recubrimiento por extrusión, recubrimiento en lecho fluidizado, atrapamiento de liposomas, coacervación de complejos de inclusión, separación de la suspensión por rotación, enfriamiento por pulverización o enfriamiento por congelación y secado por aspersión (Pulido y Beristain, 2010).

La microencapsulación mediante secado por pulverización es un método económico y ayuda a la preservación de los colorantes naturales atrapando los ingredientes en un material de recubrimiento (Pitalua, 2010).

## **2.6 Secado por aspersión**

El secado por aspersión es ampliamente usado en la industria como un método para microencapsular debido a que es económico y efectivo en la protección de materiales tales como sabores, vitaminas, aceites esenciales, colorantes, lípidos, etc. Por definición corresponde a la transformación de un fluido en un material sólido, atomizándolo en forma de gotas minúsculas en un medio de secado caliente. Es una técnica útil para cambiar los líquidos en forma de polvo sólido, que no es fácil de manejar, pero mejora la vida útil y la estabilidad del producto, para ello es necesario eliminar la humedad del material fluido (solución, dispersión o pasta) dividiéndola en pequeñas gotitas en la presencia de aire caliente para obtener un polvo seco, de geometría esférica, con aspecto de esferillas huecas, con un diámetro que puede estar entre los 20  $\mu\text{m}$  y los 200  $\mu\text{m}$  y con un aspecto de espuma desecada y solubles (Ré, 1998).

El paso inicial en el secado de un colorante implica la selección de un material de pared apropiado que se conoce como portador o agente de encapsulación. Entre los materiales de pared más utilizados en la microencapsulación de diferentes compuestos se encuentran la goma arábica, almidones hidrolizados y almidones modificados (Porrarud y Pranee, 2010). Existen otros tipos de gomas que están siendo utilizadas como material de pared tales como la goma de mezquite, el quitosano y el almidón de banano.

## **2.7 Goma Arábica**

La goma arábica es el estándar tradicional utilizado como el agente de encapsulación porque muestra una buena retención de compuestos activos, es inodoro, incoloro, insípido, y no afecta el olor, color y sabor del sistema al que se añade. Es altamente soluble en agua y se disuelve tanto en agua fría y caliente con concentraciones de hasta 50% en peso. Es un complejo de tipo polisacárido arabinogalactano exudado por Acacias, es preferido sobre todo para la encapsulación debido a sus excelentes

propiedades de emulsificación (Kandansamy y Somasundaram, 2012). Es el primer material de pared utilizado para el secado por aspersion y se utiliza principalmente para encapsular diferentes sabores. Estructuralmente, la goma arábica es una molécula ramificada formado por  $\beta$ -D-galactopiranosilo unidos por enlaces 1,3, lo que tiene  $\beta$ -D-galactopiranosil con cadenas unidas por enlaces 1,6. Las ramas están vinculadas a  $\beta$ -L-arabinofuranosil,  $\alpha$ -L-ramnopiranosil,  $\beta$ -D-glucuronopiranosyl, y moléculas de 4-O-metil- $\beta$ -D-glucuronopyranosyl. Esta goma se utiliza ampliamente por su valor nutricional y por las propiedades de la superficie de los alimentos en industria, en los procesos de microencapsulación o coacervación compleja en farmacia, cosmética o tintas (Bósquez yVernon, 2005). Se han encontrado sustitutos tales como el almidón y los productos derivados del mismo, tales como maltodextrinas y almidón tratados con *n-octenyl* anhídrido succínico, que han demostrado ser buenas opciones. (Porrarud y Pranee, 2010).

La goma se obtiene como parte del proceso de cicatrización de estos árboles conocido como gomosis (gummosis) para cerrar sus heridas y evitar de esta manera la entrada de gérmenes. Es una resina de color ámbar, recolectada normalmente a mano una vez seca (Multon, 2000). Para provocar su producción, se producen cortes longitudinales paralelos y poco profundos de 40 a 60 cm. La cantidad obtenida varía mucho entre los árboles (100 a 2,000 g por árbol), con una media aproximada de 250 g por árbol.

### **2.7.1 Propiedades de la goma arábica**

La goma arábica es de color blanco o amarillo pálido, carece de olor perceptible y es viscosa al paladar, se disuelve con facilidad por agitación en agua. Es un buen estabilizador de aromas en las emulsiones de aceite en agua. Es la goma de elección para la emulsión de cítricos. Posee tensioactividad, y forma una capa macromolecular gruesa alrededor de las gotitas de forma que se produce una estabilidad estérica. Las emulsiones con goma arábica pueden ser sometidas a desecación para dar lugar a aromas en polvo; estos tienen la ventaja de que no son higroscópicos y de que el aroma es protegido de la oxidación y la volatilización. Tiene una rápida dispersión y liberación del aroma sin afectar a la viscosidad del producto. Estos aromas estabilizados en polvo se utilizan en

productos en polvo envasados, tales como preparados para bebidas, postre, tartas, sopas, etc. (Renard et al., 2006)

La adicción de este tipo de solutos a frutas liofilizada viene dada por ser un hidrocoloide complejo con excelente solubilidad en agua, además de sus propiedades tensoactivas, su buena actividad superficial con capacidad para formar una película protectora alrededor de las gotitas de la emulsión, antiapelmazante y productor de bajas viscosidades en la solución. Estas propiedades han facilitado su amplio uso como agente encapsulación para la retención y protección de compuestos saborizantes y/o volátiles. La goma arábica tiene múltiples aplicaciones en el sector de la industria alimentaria como en la confitería, productos de panificación, productos lácteos, bebidas y fijadores del sabor, entre otras (Trommer y Neubert, 2005).

## **2.8 Goma de mezquite**

La goma de mezquite es un biopolímero que posee una gran número de grupos ionizables; químicamente, la macromolécula está constituida por residuos de L-arabinosa, D-galactosa, ácido 4, O-metil-D-glucurónico y L-ramnosa en una relación molar 2:4:1:1 y por una pequeña cantidad de proteína (0.7-5.8 %), ésta última desempeña un papel crucial en la emulsificación debido a su funcionalidad protectora como coloide y su habilidad para formar membranas viscoelásticas en la interface aceite-agua (Beristain, 1996). Este biopolímero forma un gel acuoso con otros polisacáridos y previene la sinéresis. Concentraciones típicas de galactomananos de 0.5-1.0 % puede lograr la misma viscosidad que un almidón a 4.0-6.0 %. La goma de semilla de mezquite contiene un galactomanano similar a la goma guar. Los galactomananos son agentes estabilizadores, espesantes y excelentes agentes gelificantes. La ausencia de toxicidad permite su uso en la industria de los alimentos o farmacéuticos (Yáñez, 2007).

Se considera esta goma como un producto de alto potencial industrial, ya que resulta de métodos de explotación menos destructivos, ya que se requiere del manejo y conservación de la planta, a diferencia de otros métodos de explotación de este recurso vegetal (Flores, 2007).

Los usos industriales alimenticios de esta goma son:

- Aditivo alimentario: agente microencapsulante de saborizantes y aceites esenciales (surfactantes de emulsiones agua/aceite en bebidas cítricas carbonatadas y estabilizantes en aderezos, mayonesas, cerveza, vino).
- Material estructural de películas comestibles (retarda la emisión del etileno y mejora la textura de la fruta como la guayaba y el limón).
- Microencapsulación de alimentos para larvas de especies acuícolas (López, 2009).

## 2.9 Almidones

El almidón es uno de los polisacáridos de mayor uso en las industrias farmacéutica, petrolera, textil y alimentaria, ya que en ésta última se utiliza como aditivo para impartir a los alimentos consistencia, retener humedad o para encapsular sabores. Además, se utiliza como materia prima para la producción de jarabe de fructosa y maltodextrinas. En el caso de la industria farmacéutica es un vehículo para muchos medicamentos. Por otro lado, en la industria papelera y de pegamentos es muy importante para impartir la característica a sus productos. Una aplicación reciente es en la elaboración de películas biodegradables que en el ámbito ecológico está teniendo un impacto importante (Cabrera et al., 1999; Quevedo et al., 2007). El almidón es un importante aditivo en la elaboración de alimentos, contribuye a formar la consistencia deseada en determinados productos alimenticios. Los almidones son los hidratos de carbono naturales que forman las reservas de nutrientes de las plantas y estructuralmente están constituidos por amilosa y amilopectina. La amilosa es un polímero lineal de unidades de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$  (1-4), en la cual algunos enlaces  $\alpha$  (1-6) pueden estar presentes. Esta molécula no es soluble en agua, pero puede formar micelas hidratadas por su capacidad para enlazar moléculas vecinas por puentes de hidrógeno y generar una estructura helicoidal que es capaz de desarrollar color azul por la formación de complejos con el yodo (Kanutzon y Grove, 1994). Por su parte, la amilopectina es un polímero ramificado de unidades de glucosa constituida de 94 a 96% por enlaces  $\alpha$  (1-4), y de 4 a 6% por uniones  $\alpha$  (1-6). Dichas ramificaciones se localizan aproximadamente

entre 15 y 25 unidades de glucosa. Asimismo, la amilopectina es parcialmente soluble en agua caliente y en presencia de yodo produce color rojizo violeta (Guan y Hanna, 2004).

La viscosidad es una característica funcional de los almidones como consecuencia del proceso de hinchamiento de los gránulos por la absorción de agua, ruptura de los gránulos y salida hacia el exterior de las cadenas de amilosa que posibilita la formación de estructuras tridimensionales. Contribuyen a esta propiedad térmica factores tales como la morfología de los gránulos, el contenido de amilopectina (ya que la amilosa actúa tanto como diluyente e inhibidor del hinchamiento), los pesos moleculares promedio de la amilosa y la amilopectina, así como las condiciones en las que se realizan las mediciones (concentración de almidón, tasa de calentamiento, tasa de esfuerzo cortante, entre otros; Tester y Morrison, 1990).

Además, las propiedades funcionales del almidón como la gelatinización y pastificación son importante al momento de usarlo como estabilizante y espesante en los alimentos. Durante el proceso de gelatinización el orden molecular dentro de los gránulos es destruido gradual e irreversiblemente, por esto la temperatura de gelatinización cambia para cada tipo de almidón y depende fundamentalmente de la transición vítrea de la fracción amorfa. Todo este proceso es endotérmico, requiere aproximadamente 10 J/g de almidón para efectuarlo, como lo han demostrado investigaciones con calorimetría diferencial de barrido. Los gránulos de almidón, aunque provengan de la misma fuente botánica, tienen diferente relación amilosa/amilopectina y grado de cristalinidad, estas condiciones provocan que unos gránulos de almidón sean más resistentes a efectos de altas temperaturas que otros y llegan a presentar una diferencia de hasta 10 °C para alcanzar la gelatinización (Martínez et al., 2015).

El almidón, al ser un polímero natural, presenta ventajas sobre algunos otros materiales empleados en la industria, ya que proviene de reservas naturales, es renovable, biodegradable, abundante y su procesamiento es de bajo costo (Xie et al., 2006). Por estas razones, el almidón se ha utilizado como materia prima, como aditivo o en algunos casos como sustituto de materiales derivados del petróleo (Bratskaya, 2006). Es un componente importante de alimentos y un hidrato de carbono biodegradable, complejo, hecho de miles de unidades de glucosa. Se compone principalmente de cadenas lineales y ramificadas de moléculas de glucosa, la amilosa y amilopectina. La

amilosa, que es la fracción lineal del almidón, es responsable de la formación de películas coherentes, relativamente fuertes (Fazilah et al., 2011). Es considerado como un atractivo, debido al enorme potencial para las diversas aplicaciones en el sector alimentario e industrial.

### **2.9.1 Almidón nativo**

Los almidones nativos de las diferentes especies de vegetales tienen como característica fundamental que sus propiedades fisicoquímicas y funcionales estarán influenciadas por sus estructuras granular y molecular (Wang y White, 1994).

La estructura nativa del almidón puede ser menos eficiente debido a que las condiciones del proceso reducen su uso en aplicaciones industriales debido a su fragilidad, el deterioro de las propiedades mecánicas a condiciones ambientales por la exposición con la humedad, la reducida procesabilidad debido a su alta viscosidad, su incompatibilidad con algunos solventes y polímeros, descomposición térmica, alto nivel de retrogradación y sinéresis, por lo cual, requieren de una modificación para el mejoramiento de las propiedades físicas y químicas.

### **2.9.2 Almidones modificados**

Son almidones a los que se ha realizado algún tratamiento o proceso para desarrollar propiedades funcionales deseables. La modificación química del almidón está directamente relacionada con las reacciones de los grupos hidroxilo (OH) del polímero para brindarle propiedades específicas tales como incrementar la hidrofobicidad mediante el reemplazo de estos grupos con grupos éster o éter (Rendón, 2010). Dichas modificaciones son utilizadas para mejorar su resistencia a las condiciones extremas y sus propiedades funcionales. Los almidones modificados muestran mayor estabilidad a condiciones extremas de procesamiento, incrementan su resistencia a la retrogradación y mejoran la estabilidad durante el congelamiento. Por ejemplo, el almidón de plátano oxidado a diferentes niveles, aumentó su temperatura de gelatinización y el almidón con bajo nivel de oxidación presentó mayor viscosidad respecto al almidón nativo (Sánchez et al., 2005).

### **2.9.3 Almidones modificados por OSA**

Entre las modificaciones por estabilización, únicamente los almidones modificados con anhídrido octenil succínico (OSA por sus siglas en inglés) están permitidos para uso en alimentos. La modificación con OSA fue realizada por primera vez y patentada en 1953 (Sweedman et al., 2013).

Los almidones modificados por OSA tienen una excelente capacidad para reducir la tensión superficial, así como la tensión en la interfase aire/agua. En estudios realizados entre dispersiones con burbujas de aire, mostraron mejores resultados que los almidones oxidados para estabilizar emulsiones. Cuando se dispersa en agua, el almidón OSA migra a la interfase aire/agua formando una capa que sirve de límite, mediante la cual los grupos hidrófobos se orientan hacia el aire, mientras que el almidón se orienta hacia las moléculas de agua (Zhu et al., 2013). Los almidones OSA pueden funcionar como estabilizadores electrostéricos, aunque debido al tamaño de sus moléculas con respecto al número de grupos sustituidos, su función es principalmente estérica (Shogren y Biresaw, 2007).

#### **2.9.3.1 Usos y aplicaciones de almidones OSA**

El anhídrido octenil succínico ataca al almidón a través de un enlace éster, lo que hace que los almidones modificados por OSA formen una película fuerte entre el aceite y el agua, dando lugar a emulsiones resistentes a la aglomeración (Liu et al., 2008; BMiller, 2009), razón por la cual el almidón OSA está siendo utilizado dentro de la industria de los alimentos en los Estados Unidos (Sweedman et al., 2013). Generalmente los almidones OSA son utilizados como emulsificantes y estabilizantes en muchos productos alimenticios, cosméticos y farmacéuticos (Reiner et al., 2010), en diferentes sistemas modelo aceite-agua, considerando aceites de varios orígenes botánicos. Las cargas iónicas en las superficies de los gránulos de almidón por la presencia del grupo OSA permite que estos absorban grandes cantidades de gotas de aceite (Varona et al., 2009). Esto sugiere que existe una capa fina de las macromoléculas del almidón que se absorben en la interfase aceite-agua.

Las aplicaciones de los almidones OSA dependen del grado de sustitución, así como del porcentaje de reactivo que se emplea durante la reacción; se observa que en la



industria alimenticia se maneja una concentración de < 3 % de OSA, mientras que en la industria farmacéutica y de cosmetología es posible emplear mayores cantidades del reactivo.

Las propiedades más importantes a considerar para determinar la utilización del almidón en la elaboración de alimentos y otras aplicaciones industriales incluyen las fisicoquímicas tales como la gelatinización y retrogradación, las funcionales tales como la solubilidad, hinchamiento, absorción de agua, sinéresis y comportamiento reológico en sus pastas y geles (Wang y White, 1994).

Las fuentes convencionales más importantes para la extracción de este polisacárido son los granos de cereales como el maíz, trigo, arroz y sorgo, tubérculos como la papa, yuca, boniato y sagú, así como algunas hojas, semillas de leguminosas y frutas, entre otras (Betancur et al., 2004). La tendencia actual es buscar fuentes no convencionales como alternativas para obtener almidones que presenten diversas características fisicoquímicas, estructurales y funcionales, con la finalidad de ampliar la gama de usos en la industria. Entre las materias primas que pueden ser utilizadas como nuevas fuentes de extracción de este polímero se encuentran los tubérculos, ya que estos juegan un papel significativo en el sistema global de alimentación y contribuyen a los requerimientos energéticos de más de 2 millones de personas en los países en vías de desarrollo. Los cultivos más importantes de raíces y tubérculos a nivel mundial son la yuca (*Manihot esculenta*), batata (*Ipomea batata*), papa (*Solanum tuberosum*), ñame (*Dioscorea* spp.), ocumo (taro), ayutia (*Colocasia esculenta*) y tannia (*Xanthosoma* spp.). En conjunto, estos cultivos ocupan cerca de 50 millones de hectáreas en el mundo (CIAT, 1997). Es por esta razón que se continúa buscando otras fuentes de almidón que contribuyan a la producción de este polímero como puede ser también el almidón de banano. El banano inmaduro es una fruta rica en almidón (Bello et al., 2000). La literatura plantea que de este fruto se puede obtener aproximadamente un 70% de rendimiento de este hidrato de carbono (Bello Pérez, 2002) y se señala que la incorporación de almidón nativo de banano aporta, a los alimentos que lo contengan, fibra dietética que incluye almidón resistente (Pacheco y Giusepina, 2005).

#### 2.9.4 Almidón de banano

Entre algunas de las frutas que pueden utilizarse como fuentes potenciales de almidón, se encuentran el mango, el plátano y el banano, los cuales en estado verde o inmaduro, presentan entre un 50 y 60 % de almidón (Cabrera et al., 1999).

El almidón de plátano ha sido estudiado en los últimos diez años, proponiéndose su uso en diversos alimentos, ya que se caracteriza por presentar alto contenido de almidón resistente, *in vitro* constituye aproximadamente el 37 % (Aparicio et al., 2005) e *in vivo* entre 50 y 66 % (Englyst y Cummins, 1986). Además, el almidón de plátano se ha utilizado en la elaboración de películas biodegradables (Romero-Bastida, 2011). El almidón de plátano presenta un patrón de difracción de rayos X tipo C, que involucra ambos polimorfismos (A y B) dentro de la estructura granular, un porcentaje de cristalinidad (29 %) que impacta en los valores de temperatura y entalpía de gelatinización, a pesar de su mayor contenido de amilosa (37 %) que el almidón de maíz normal (Espinoza et al., 2009). Actualmente, no se conoce la distribución de la amilosa y amilopectina dentro de la estructura granular del almidón de plátano, lo cual ayudaría a entender sus propiedades fisicoquímicas, funcionales y de digestibilidad, así como explicar su hidrólisis enzimática y su susceptibilidad a diferentes reactivos químicos usados durante su modificación (Nuñez et al., 2011).

Como alimento primordial, los bananos, incluidos los plátanos y otros tipos de bananos de cocción, contribuyen a la seguridad alimentaria de millones de personas en gran parte del mundo en desarrollo, proporcionan ingreso y empleo a las poblaciones rurales. Es la fruta fresca más exportada del mundo en cuanto a volumen y valor nutricional (Arias et al., 2004). Dentro de la producción de bananos, se cultivan nueve mil hectáreas y se obtiene una producción de 20 millones de cajas, de las cuales cinco millones cumplen los estándares de calidad exigidos por los mercados Internacionales (SAGARPA, 2006).

Actualmente una tercera parte de la fruta que no se exporta se destina al consumo interno como fruta fresca, otra tercera parte se emplea como sustrato en la producción de fertilizantes orgánicos (compost) para el cultivo de la misma fruta y, una tercera parte continúa considerándose como residuo (Guevara et al., 2012). Sin embargo, no se ha tenido el manejo correcto de los residuos sólidos biodegradables, como resultado de la

actividad agroindustrial bananera, siendo durante varios años motivo de preocupación para las comunidades, autoridades ambientales, empresas comercializadoras, clientes y organizaciones internacionales, tal situación, conlleva al deterioro medioambiental, manifestado la presencia de olores ofensivos, incremento de plagas y enfermedades, causando perjuicio a las comunidades que habitan en las zonas de influencia de las áreas producción (Henaó, 2002). Son precisamente el residuo o banano de rechazo los que potencialmente se pueden usar en la producción de biocombustibles, películas plásticas o como material de pared para la elaboración de capsulas.

### **2.10 Liberación controlada**

La liberación controlada se puede definir como un método por el cual uno o más agentes activos o ingredientes se ponen a disposición en un sitio deseado, en tiempo y velocidad específica. Muchos investigadores han buscado una mejor comprensión de los efectos que rigen la liberación de sabores en matrices complejas ya que esto representa un objetivo importante en muchos campos, incluyendo las industrias alimentarias. Para los sistemas de matrices encapsulantes de compuestos volátiles, la liberación depende de varios procesos mutuamente dependientes, como la difusión del compuesto volátil a través de la matriz, tipo y geometría de la partícula, la transferencia de la matriz al medio ambiente, y la degradación/disolución del material de la matriz. Algunas de las ventajas de la liberación controlada son; los ingredientes activos se liberan a velocidades controladas durante períodos prolongados de tiempo, se puede evitar o reducir la pérdida de ingredientes durante el procesamiento y la cocción, además se pueden separar componentes reactivos o incompatibles, entre otras (Atmane et al., 2006).

La liberación controlada está en función del tipo de polímero empleado que puede ser hidrofílico o lipídico. Los mecanismos fundamentales de liberación son la difusión y la erosión. La difusión se rige por la entrega del medio acuoso al interior del sistema donde se disuelve el compuesto y difunde a través del material polimérico, creando poros por los cuales se libera el resto de los compuestos contenidos en las microesferas. En la erosión se pone de manifiesto un mecanismo de liberación por relajación de las macromoléculas, lo cual está determinado por la biodegradabilidad intrínseca del polímero y las características del medio de disolución en que se encuentra.

La erosión trae consigo el cambio constante de la geometría y como resultado de ello la liberación del principio activo estará influenciada por una combinación de ambos mecanismos (difusión/erosión) que no es más que la degradación de las microesferas. La liberación controlada consta de tres etapas: primero a) la liberación del principio activo enlazado a la superficie o embebido en la región superficial, b) la liberación difusional del principio activo se da a través de la matriz del polímero y a través de los poros durante la degradación de la matriz y por último c) la liberación erosional del principio activo se da por la desintegración de la matriz del polímero y disolución después que la matriz pierde su integridad y las cadenas del polímero, son degradadas a un tamaño lo suficientemente pequeñas como para ser solubilizadas (Parra, 2010).

### **2.11 Digestión *in vitro***

La digestión del almidón es una respuesta metabólica importante donde la velocidad y el grado de digestión, así como su absorción en el intestino delgado, son características importantes en la nutrición (Sasaki et al., 2009) ya que determinan cuanta glucosa se absorberá hacia el torrente sanguíneo. Diversos estudios han mostrado una alta correlación entre la velocidad de digestión del almidón y la respuesta glucémica por varios métodos de digestión *in vitro* que simulan la situación *in vivo* (Kim y White, 2012; Magaletta et al., 2010).

Actualmente se han reportado diferentes estudios sobre la velocidad y el nivel de digestibilidad de diversos almidones de cereales como el maíz (Zhang et al., 2014), arroz (Lee et al., 2013), trigo (Hu, 2014) y cebada (Deckardt, 2014; Kim et al., 2013); sin embargo, los análisis completos donde se reporten la velocidad de hidrólisis y digestibilidad de harinas y almidones son escasos, destacando las investigaciones realizadas por Kim y White (2012) donde evaluaron la velocidad de digestión *in vitro* del almidón y la estimación del índice glucémico en harinas y almidones de avenas de variedades típicas y líneas altas en  $\beta$ -glucanos (IA95 y N979, desarrolladas en la Universidad Estatal de Iowa, USA). Los resultados de estos investigadores mostraron que la fibra soluble ( $\beta$ -glucanos) disminuyó la velocidad de digestión del almidón sin que hubiera diferencia significativa en la digestibilidad del almidón entre los almidones de avenas extraídas de las diferentes líneas.

### 3. JUSTIFICACIÓN

La industria de alimentos utiliza cada vez más antioxidantes, por lo beneficios a la salud que han demostrado, pero este tipo de compuestos son muy propensos a que se dañen por estar expuestos a ciertos factores como los ambientales, tales como temperaturas, pH, oxígeno, entre otros, así como también los procesos en la industria, lo que hace necesario la búsqueda de nuevas técnicas para reducir la inestabilidad y prolongar la vida útil de estos compuestos, para lo cual, se requiere la utilización de tecnologías, que protejan a dichos antioxidantes de factores que puedan deteriorarlos. Una de las tecnologías es la microencapsulación y su aplicación en alimentos. Este proceso evita la degradación prematura de compuestos de alto valor nutricional con propiedades funcionales, para dotar de mayor calidad nutricional a los alimentos enriquecidos con los mismos. Se ha intensificado la búsqueda de otros polímeros más apropiados y específicos, o la combinación de polímeros naturales con sintéticos, con el objetivo de obtener mezclas con propiedades mejoradas, que satisfagan determinados requerimientos. El suministro de ciertas gomas ha sido muy irregular y limitado, causando muchas variaciones en los precios. La escasez de este producto ha motivado a buscar ingredientes con costo competitivo y sin preocupaciones de suministro. En la actualidad hay un interés creciente en la industria por utilizar nuevos compuestos, los cuales se puedan obtener de fuentes naturales, entre ellos podemos encontrar a la goma arábiga, goma de mezquite, quitosano y el almidón de banano. Por consiguiente, la presente propuesta está dirigida al aprovechamiento de las propiedades de estos biopolímeros para ser utilizados como material de pared en la elaboración de cápsulas, para la protección de ciertos antioxidantes de importancia industrial en el área de alimentos, así como también, por los beneficios a la salud que proporciona su consumo.

#### **4. HIPÓTESIS**

Es posible controlar la liberación de antioxidantes microencapsulados bajo condiciones de digestión *in vitro* utilizando matrices de diferentes biopolímeros solos y en mezclas

## 5. OBJETIVO

### 5.1 Objetivo General

Determinar el efecto de los diferentes biopolímeros en la cinética de liberación *in vitro* y en la degradación de los carotenoides microencapsulados en matrices líquidas y sólidas

### 5.2 Objetivos Particulares

- Obtener y modificar del Almidón de Banano
- Caracterizar la goma de mezquite, goma arábica y almidón de banano
- Elaborar emulsiones aceite en agua (O/W) estabilizadas con diferentes matrices biopoliméricas (goma de mezquite, goma arábica y almidón de banano) y microcápsulas por el método de secado por aspersión
- Determinar la estabilidad física de las emulsiones a través de la tasa de coalescencia e índice de cremado
- Medir la estabilidad química de los carotenoides en microencapsulados durante el tiempo
- Cuantificar la liberación de las emulsiones y las microcápsulas *in vitro* simulando las condiciones gástricas
- Modelar cinéticas de liberación de las emulsiones y las microcápsulas elaboradas con las diferentes matrices encapsulantes

## 6. MATERIAL Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Biológicas, en el Departamento de Alimentos de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

### 6.1 Materiales

El banano de rechazo fue donado por el Rancho “La Gloria” localizado en el km 43.5 de la carretera Villahermosa a Teapa, Tabasco. Se utilizó almidón modificado de maíz comercial MIRASPERSE 623™ (amilopectina, hidrogenofosfato, 2 hidroxipropil éter 113894-92-1), oleorresina de flor de cempasuchil donado por PIASA S. A. de C. V., octenil succinil anhidro adquirido en Sigma Aldrich (42482-06-4), azida de sodio ( $\text{NaN}_3$ ) y el aceite de soya adquiridos en Desarrollo de Especialidades Químicas, S. A. de C. V. Se utilizó agua destilada. La goma arábiga Kondofan (en lagrima) se adquirió en Natural Products México, goma de mezquite, cloruro de sodio NaCl (JTB Baker® ACS), mucina (a partir del estómago porcino Cat. M2378), pepsina (a partir de mucosa gástrica porcina Cat. P7000), Lipasa (a partir del páncreas porcino Cat. L3126) adquiridos en Sigma Aldrich (St. Louis, MO, USA), sales biliares (extractos biliares porcino) adquirido en MP Biomedicals, LLC., cloruro de sodio (NaCl), fosfato de sodio monobásico ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) y fosfato de sodio dibásico ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ), cloruro de potasio KCl y azida de sodio ( $\text{NaN}_3$ ) adquiridos en Desarrollo de Especialidades Químicas, S. A. de C. V.

### 6.2 Métodos

#### 6.2.1 Obtención del almidón de banano Enano Gigante (*Musa AAA*)

Se utilizó almidón de banano Enano Gigante (*Musa AAA*) en estado verde, caracterizado por ser banano de rechazo por no cumplir con las características de exportación. Las muestras se pesaron, lavaron y trocearon; los trozos obtenidos se procesaron en una licuadora industrial marca Turmix, la solución obtenida se hizo pasar por un tamiz de malla número 100, lavándose de tres a cuatro veces con una solución de ácido cítrico al 3 % a 40 °C para evitar la oxidación, la fibra retenida en el tamiz se



eliminó y el filtrado se mantuvo a 4 °C durante toda la noche para su sedimentación. Al día siguiente, se eliminó el sobrenadante por decantación. La pasta obtenida se extendió en bandejas y se secó en estufas a 45 °C por 24 h, se pulverizó en un mortero y se pasó por un tamiz de malla número 100 (Aparicio, 2003). El almidón obtenido se pesó, se envasó en tubos fálcon de 50 mL y se almacenó a temperatura ambiente hasta su utilización.

### **6.2.2 Solución stock del antioxidante**

Se preparó una solución stock del antioxidante (carotenoides) de acuerdo a la metodología establecida por Nik et al., (2010), con modificaciones, en donde se adicionó una concentración de 0.2 % del  $\beta$ -caroteno en aceite de soya a temperatura ambiente en agitación durante 4-5 h. Esta solución stock de  $\beta$ -caroteno-aceite de soya, se filtró (tamaño de poro de 0.45  $\mu$ m) a vacío, luego se colocó en un frasco de vidrio color ámbar y se almacenó a -20 °C hasta su uso. Antes de uso, la solución stock, se calentó a 37 °C durante 30 min.

### **6.2.3 Preparación de la fase acuosa de goma arábica (GA) y goma de mezquite (GM)**

Las soluciones de GA y GM se prepararon mediante la dispersión de la goma en polvo en agua destilada y agitación constante durante al menos 2 h. Las soluciones fueron posteriormente almacenadas a 4 °C durante toda la noche para asegurar una completa hidratación (Yao et al., 2013). Se adicionó la azida de sodio (0.02 %) como un agente antimicrobiano para prevenir el crecimiento microbiano en las emulsiones (Aiqian et al., 2013).

#### **6.2.3.1 Preparación de la emulsión de aceite en agua enriquecida con carotenoides**

Se elaboraron emulsiones de aceite en agua (O/W), con dos matrices biopoliméricas, goma arábica (10 % de GA y 10 % de fase oleosa), y la goma de mezquite (10 % de GM, 10 % de fase oleosa), las emulsiones se obtuvieron por el método de homogenización de alto corte (IKA<sup>®</sup> T50 DIGITAL ULTRA TURRAX), en

donde, se mezcló la fase acuosa de la goma y la fase oleosa con el antioxidante a 300 rpm, posteriormente se aumentó la velocidad a 7000 rpm/5 min.

## **6.2.4 Modificación del almidón de banano**

### **6.2.4.1 Hidrólisis Ácida**

Se llevó a cabo antes de realizar las modificaciones químicas del almidón de acuerdo a lo reportado por Zambrano y Camargo (2001) con algunas modificaciones. Se preparó una dispersión de almidón de banano al 40% de sólidos. El almidón fue hidrolizado en un baño de temperatura controlada en agitación constante. Posterior a la hidrólisis, el pH de la muestras fue ajustado con NaOH al 10 % y la dispersión de almidón fue centrifugada (Centrifuga HERLE Z513 K) a 6000 rpm por 10 minutos. Se llevó a cabo un lavado con agua destilada para eliminar el excedente de ácido. Posteriormente el almidón fue secado en una estufa con circulación de aire a 45 °C durante 24 horas, pulverizado y pasado por una malla con apertura de 250 µm.

### **6.2.4.2 Modificación del almidón por el método OSA (Octenil Succínico Anhídrido)**

Las soluciones de almidón (almidón de banano nativo, almidón de banano modificado y almidón de maíz modificado comercial) se prepararon de acuerdo a la metodología de Doki (2012), disolviendo 4.5 % en 100 mL de agua destilada a 90 °C. Se realizó de acuerdo al método descrito por Murúa et al., (2009) con algunas modificaciones, en suspensión acuosa. A una dispersión al 35 % de sólidos de almidón de banano sometido a hidrólisis ácida se le adicionó por goteo y en agitación el reactivo octenil succínico anhídrido en una proporción de 2 mL/50 g de almidón en base seca, durante dos horas a un pH constante de 8.5-9.0 a 45 °C. Se mantuvieron las mismas condiciones durante un tiempo total de 6 horas. Posteriormente se ajustó el pH a 4.5 y la suspensión fue centrifugada para eliminar residuos del reactivo. Se llevaron a cabo dos lavados con agua destilada. El almidón succinatado fue secado a 45 °C durante 24 horas, pulverizado y cribado en una malla de 250 µm.

#### **6.2.4.2.1 Preparación de la solución de almidón OSA para las emulsiones**

Las soluciones de almidón OSA se prepararon disolviendo la muestra en agua destilada a una temperatura de calentamiento de 50 °C

#### **6.2.4.2.2 Preparación de las emulsiones con el almidón modificado**

#### **6.2.4.2.3 Solución stock del antioxidante (Fase Oleosa).**

Se preparó de acuerdo al método de Nik et al., (2010), como se describe en el punto 6.2.2.

#### **6.2.5 Preparación de emulsiones**

Las emulsiones se prepararon de acuerdo a la metodología establecida por (Krstonošić et al., 2015) con modificaciones, las cuales contenían 0.05 y 0.1 % de aceite de soya. La fase continua fue formada disolviendo la cantidad de 4.5 % de almidón (almidón de banano nativo, almidón de banano modificado y almidón de maíz modificado comercial) en agua. Las emulsiones se prepararon a temperatura ambiente y a 90 °C y se agitaron por dos horas. Las soluciones acuosas de almidón que se hidrataron a temperatura ambiente solo se agitaron por 2 horas, se almacenaron durante la noche a 4 °C para permitir la hidratación completa. Se agregó azida de sodio (0.02 %, p/v), utilizándolo como un agente antimicrobiano (Ye, Lo y Singh, 2012). La cantidad adecuada de aceite fue calculada sobre la cantidad total de la emulsión y fue adicionada a la fase continua para formar la emulsión. La homogenización fue llevada a cabo con ayuda de un homogenizador de alto corte IKA® T50 DIGITAL ULTRA TURRAX, a 300 rpm mientras se adicionaba la fase oleosa y posteriormente se aumentó a 7500 rpm por 5 min.

#### **6.2.6 Digestión *in vitro***

Cada emulsión  $\beta$ -caroteno se pasó a través de un modelo *in vitro* de la digestión en que simulaba la boca, el estómago y el intestino delgado. Todos los fluidos simulados se prepararon en base a lo reportado Hur *et al.*, 2009.

**6.2.6.1 Sistema inicial:** la emulsión inicial estaba en una concentración de 20 % de goma arábica con una  $\phi$  de 0.2 que contenía un  $\beta$ -caroteno de la flor de cempasúchil. 6 g de emulsión se colocaron en un vaso de vidrio en un baño de agua a 37 °C y 100 rpm.

**6.2.6.2 Fase de la boca simulada:** Se utilizó una solución de saliva simulada que se preparó mezclando 0.1594 g de NaCl, KCl 0.0202 g y 0.02 g de mucina en una solución tampón de fosfato (10 mM, pH 7.0) aforando a 100 mL, y ajustando el pH a 6.8. La muestra inicial emulsión (6 g) se mezcló con 6 g de solución de saliva simulada. La mezcla se mantuvo a 37 °C con agitación continua a 100 rpm durante 5 min en un baño de agua de temperatura controlada.

**6.2.6.3 Fase estómago simulado:** se preparó jugo gástrico simulado disolviendo 0.32 % de pepsina y 0.2 % en peso de NaCl en una solución tampón de fosfato (10 mM, pH 2.5). Posteriormente 12 g de solución de estómago simulado se añadieron después a 12 g de la muestra de saliva del experimento anterior y la mezcla (pH 2,5) se agitó durante 2 h a 37 °C, 100 rpm).

**6.2.6.4 Fase del Intestino delgado simulado:** para este fin, 4 g de una solución de sales biliares (375 mg sales biliares disolvió en tampón fosfato 10 mM, pH 7.0), 2.5 g de la suspensión recién preparada lipasa (60 mg polvo de lipasa disperso en tampón de fosfato, pH 7.0) y 7 g de tampón de fosfato 10 mM se mezclaron con 24 g de una muestra de estómago simulado y el sistema se ajustó de nuevo a pH 7.0. La mezcla se incubó con agitación continua a 100 rpm a 37 °C durante un máximo de 2 h.

### **6.2.7 Determinación del beta-caroteno después de la digestión *in vitro***

El contenido de  $\beta$ -caroteno en la emulsión se determinó siguiendo el método descrito por (Zhanqun *et al.*, 2014). Se tomó 1 mL de la emulsión se extrajo con una mezcla de 2 mL de etanol y 3 mL de n-hexano. Después la mezcla se agitó, se separó la fase de hexano y se realizó la extracción de la fase de hexano coloreada. La extracción se repitió dos veces más y las fases de hexano se combinaron. Posteriormente se midió

la absorbancia con un espectrofotómetro Shimadzu UV-1800 UV-Vis a 450 nm. La concentración de  $\beta$ -caroteno se obtuvo haciendo referencia a una curva estándar de  $\beta$ -caroteno preparado bajo las mismas condiciones (Yuan et al., 2008). El contenido de la digestión  $\beta$ -caroteno se expresó como la concentración de  $\beta$ -caroteno relativa en porcentaje:  $C(t) / C_0$ , donde  $C(t)$  es el contenido de  $\beta$ -caroteno en la fracción micelar después de la digestión *in vitro* y  $C_0$  es el  $\beta$ -caroteno cantidad en la dispersión original (Xu et al., 2014).

#### **6.2.7.1 Determinación del tamaño de gota**

Los tamaños de gota de las emulsiones de  $\beta$ -caroteno se determinaron antes y después de la digestión *in vitro* utilizando un equipo de difracción láser (Mastersizer 3000, Malvern). Este instrumento mide el tamaño basado en la dispersión de una luz láser. La muestra se fue agregando gota a gota hasta que el equipo inicio la lectura, el tamaño de las gotitas se determinó como resultados el  $D_{3,2}$  como diámetro promedio de área y el  $D_{4,3}$  como el diámetro promedio de volumen (Xu et al., 2014).

#### **6.2.7.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

Una gota de cada muestra de almidón de banano se aplicó por rotación sobre charola de aluminio y se congelaron con nitrógeno líquido. Después, las muestras se secaron y revistieron por bombardeo iónico con oro a vacío (BAL-TEC-005 SCD instrument) (180s/30 mA/50 mm de distancia). Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) fueron tomadas con el microscopio electrónico de barrido Jeol JSM 6460LV (Tokio, Japón) con un voltaje de aceleración de 25 kV (Krstonošić et al., 2015).

#### **6.2.7.3 Medición de la estabilidad de almacenamiento Emulsión (Índice de Cremado)**

Las diferentes emulsiones recién elaboradas fueron colocadas en tubos Fálcon de plástico de 15. Los tubos se taparon para evitar la evaporación, y se almacenaron en reposo a temperatura ambiente durante 21 días. Durante el almacenamiento, la extensión de formación de crema fue caracterizada por la formación del índice de cremado (IC,

%), que se define como  $IC \% = (H_S/H_E) \times 100 \%$ , donde el  $H_S$  es la altura de la capa de suero y  $H_E$  es la altura total de la emulsión (Chen 2011; Kongkaew et al., 2012 ).

### **6.3 Análisis estadístico**

Para evaluar las diferencias entre los diferentes tratamientos ( $n=3$ ), se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un criterio de clasificación y se aplicó el procedimiento para la comparación múltiple de medias de Tukey con un  $\alpha = 0.05$ . El análisis estadístico se realizó con el software JMP 5.0.1 (Estatistical Discovery Software).

## **7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **7.1 Obtención del almidón de banano**

El contenido de almidón obtenido se determinó de acuerdo a la metodología de Aparicio (2003), obteniéndose un contenido de almidón de 82.33 % y fue similar a lo descrito por dicho autor. La presencia de almidón y resistente en bananos y plátanos se debe también a que éstos frutos contienen una mayor cantidad de amilosa lo cual favorece la formación de almidón resistente (Millán et al., 2005).

### **7.2 Emulsiones de Goma Arábica (GA) y Goma de Mezquite (GM)**

#### **7.2.1 Estabilidad física de las emulsiones de GA**

En la presente investigación se formularon 4 diferentes emulsiones con una fracción volumétrica de aceite o fase oleosa ( $\phi$ ) de 0.1 y 0.2 con  $\beta$ -caroteno como fase dispersa, conteniendo en la fase acuosa goma arábica (GA). Se realizó la medición del diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) y del diámetro promedio volumétrico ( $D_{4,3}$ ) con el equipo Malvern Mastersizer 3000, además, para determinar la estabilidad en las emulsiones de aceite en agua (O/W) estabilizadas con  $\beta$ -caroteno se utilizó difracción láser durante el tiempo de almacenamiento. Las concentraciones que se manejaron en las emulsiones evaluadas se conformaron de la siguiente manera: Em1\_GA al 20 %  $\phi$  0.1; Em2\_GA al 20 %  $\phi$  0.2; Em3\_GA al 10 %  $\phi$  0.1 y Em4\_GA al 10 %  $\phi$  0.2.

Cada una de las emulsiones se analizó directamente después de su preparación, los tiempos de evaluación fueron 1, 3, 7 y 14 días, los resultados de las mediciones con respecto al diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) de las emulsiones de GA se muestran en la Figura 1.

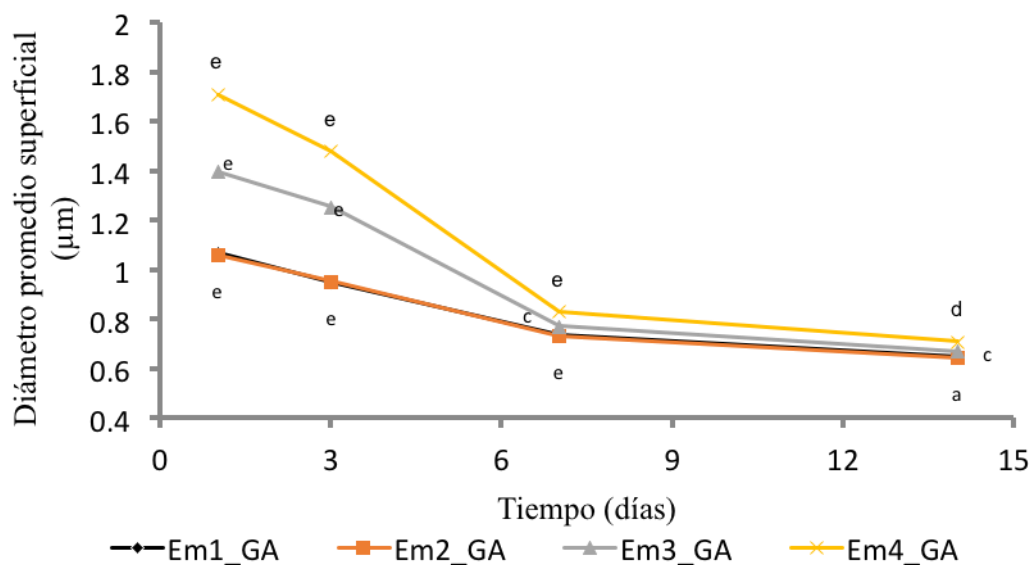


Figura 1. Diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) de las emulsiones preparadas con Goma Arábica. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ).

En relación al diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ), se observa que las emulsiones que mostraron mayor estabilidad con respecto al tiempo fueron las emulsiones 1 y 2 con diferentes días de almacenamiento, con un tamaño de partícula de  $1.07 \mu\text{m}$  hasta  $0.64 \mu\text{m}$  en la emulsión 1 y de  $1.06 \mu\text{m}$  hasta  $0.64 \mu\text{m}$  en la emulsión 2. Siendo estadísticamente diferentes a los valores encontrados en las otras dos emulsiones evaluadas ( $p < 0.001$ ). En relación a las emulsiones 3 y 4, se observó una disminución de tamaño de forma en ambas emulsiones sin embargo, presentaron mayor tamaño de partícula en comparación a las emulsiones con 20 % de sólidos de GA como se observa en la Figura 1.

Con respecto al diámetro promedio volumétrico de las emulsiones con GA, se encontró que las emulsiones presentaron diferencia significativa ( $p < 0.001$ ) entre las emulsiones 1 y 2 en comparación con las emulsiones 3 y 4. Obteniendo valores de  $1.4 \mu\text{m}$  hasta  $0.9 \mu\text{m}$  para emulsión 1 y 2, mientras que para la emulsión 3 y 4 fue de  $2.8 \mu\text{m}$  hasta  $1.2 \mu\text{m}$  y de  $3.7 \mu\text{m}$  hasta  $1.5 \mu\text{m}$  respectivamente (Figura 2).



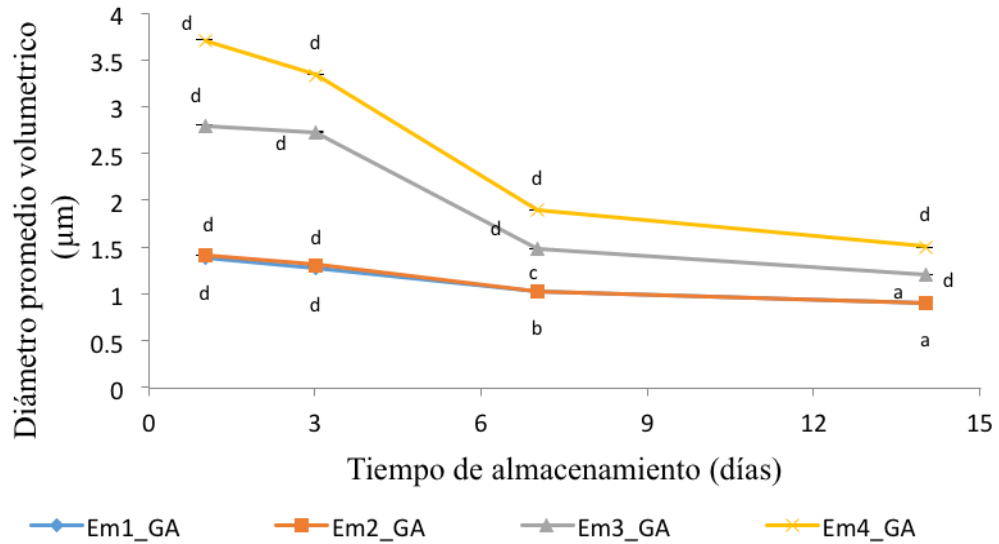


Figura 2. Diámetro promedio volumétrico ( $D_{4,3}$ ) de las emulsiones preparadas con goma arábica. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ).

### 7.2.2 Índice de cremado de las emulsiones de GA

Éste análisis nos permite visualizar el comportamiento de la emulsión, entre mayor sean los valores obtenidos del índice de cremado más inestable es el sistema analizado. En los resultados obtenidos se observó que las emulsiones 1 y 2, fueron diferentes estadísticamente ( $p < 0.001$ ) en comparación a las emulsiones 3 y 4, observando que las emulsiones que presentaron mayor inestabilidad fueron las estas últimas, con valores de 11.8 y 25 % respectivamente, con una concentración de 10 % de GA y una  $\phi$  de 0.1 y 0.2 respectivamente. La inestabilidad en las emulsiones 3 y 4 puede ser debido a las interacciones de las diferentes concentraciones de los biopolímeros en las formulaciones, mientras que en las demás emulsiones fue de 0 %, los resultados se muestran en Figuras 3 y 4.

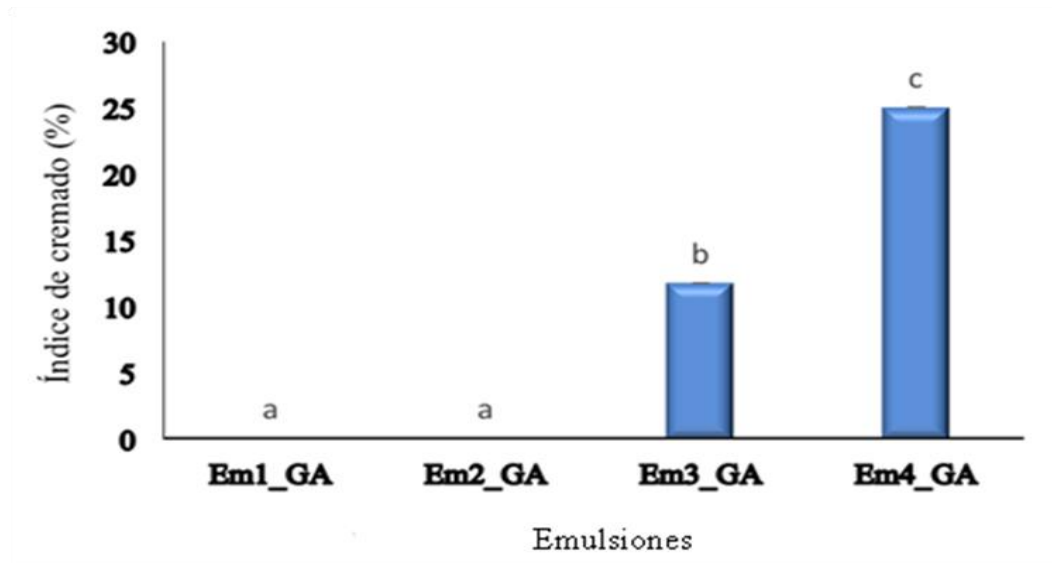


Figura 3. Índice de cremado de las emulsiones preparadas con goma arábica. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ).

La Figura 4 se muestra como se comportaron las emulsiones de manera visual de acuerdo a su estabilidad con cada una de las concentraciones utilizadas en este estudio, si las emulsiones presentan alguna separación física entre los materiales de la emulsión, es una característica de inestabilidad, entre más separación exista más inestabilidad existe, las emulsiones que presenten valores de 0 % son las más estables.



Figura 4. Imagen de las formulaciones observadas que fueron estables (Em\_1 y Em\_2) e inestables (Em\_3 y Em\_4).

### 7.2.3 Tasa de coalescencia de emulsiones de GA

Otra de las características importantes en la estabilidad de una emulsión es la determinación de la tasa de coalescencia de las emulsiones elaboradas, se obtuvieron tasas de coalescencia de  $8.00 \times 10^{-8}$  y de  $5.00 \times 10^{-8}$  para las emulsiones 2 y 1 respectivamente, lo cual nos indica una buena estabilidad, debido a que entre más pequeño sea su valor, mejor será la estabilidad de la emulsión. Por otro lado, para las emulsiones 3 y 4 los resultados fueron de  $3.00 \times 10^{-7}$  y  $2.00 \times 10^{-7}$  respectivamente, presentando mayor inestabilidad.

Tabla 1. Tasa de coalescencia de las formulaciones con GA

	Tasa de coalescencia		
	%	$\phi$	
<b>Em1_GA</b>	20	0.1	$5.00 \times 10^{-8}$
<b>Em2_GA</b>	20	0.2	$8.00 \times 10^{-8}$
<b>Em3_GA</b>	10	0.1	$3.00 \times 10^{-7}$
<b>Em4_GA</b>	10	0.2	$2.00 \times 10^{-7}$

### 7.3 Estabilidad física de las emulsiones de GM

Para las emulsiones de GM con una fracción volumétrica de aceite o fase oleosa ( $\phi$ ) de 0.1 y 0.2 con  $\beta$ -caroteno como fase dispersa, conteniendo en la fase acuosa Goma Mezquite (GM). Se realizó la medición del diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) y del diámetro promedio volumétrico ( $D_{4,3}$ ) para determinar la estabilidad con respecto al tiempo de almacenamiento. Las concentraciones que se manejaron en las emulsiones evaluadas se conformaron de la siguiente manera: Em5\_GM al 20 %  $\phi$  0.1; Em6\_GM al 20 %  $\phi$  0.2; Em7\_GM al 10 %  $\phi$  0.1 y Em8\_GM al 10 %  $\phi$  0.2. Cada una de las emulsiones se analizó directamente después de su preparación, los tiempos de evaluación fueron los mismos que para GA.

Con respecto al diámetro superficial promedio ( $D_{3,2}$ ) como se muestra en la Figura 5. En el caso de las emulsiones preparadas con GM, no presentaron diferencia en relación a los tamaños de partícula, siendo similares las mediciones y presentando un comportamiento muy parecido con respecto al paso tiempo de almacenamiento. En el caso de la emulsión 7 y 8, presentaron valores al inicio de la evaluación de 1.3  $\mu\text{m}$  y 1.4  $\mu\text{m}$  respectivamente y al final del experimento fueron de 0.6  $\mu\text{m}$ . Por otro lado, no se encontró diferencia significativa ( $p < 0.001$ ) en las emulsiones 5 y 6. Durante el tiempo de almacenamiento, se mostro un comportamiento similar, con un decremento en el diámetro promedio superficial para los diferentes tratamientos.

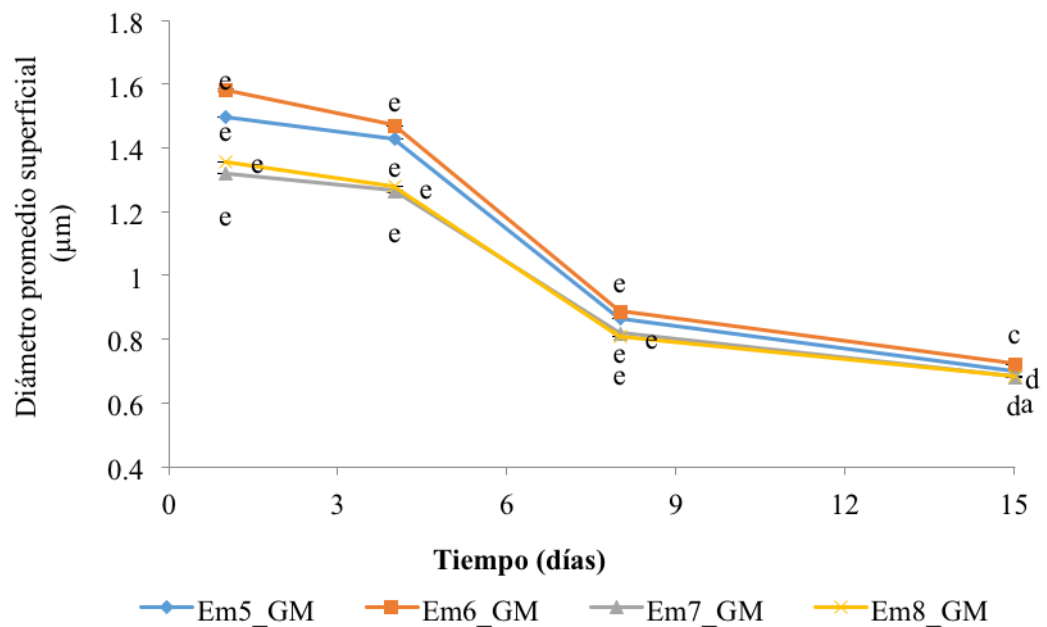


Figura 5. Diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) de emulsiones preparadas con GM. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ )

Con respecto al diámetro promedio volumétrico ( $D_{4,3}$ ), se observó que las emulsiones de GM con una concentración del 10 %, presentaron diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) con respecto a las emulsiones con 20 % de sólidos. Mostrando resultados de 2.1  $\mu\text{m}$  hasta 1.2  $\mu\text{m}$  para la emulsión 7 y 2.3  $\mu\text{m}$  hasta 1.3  $\mu\text{m}$  para la emulsión 8, mientras que las emulsiones 5 y 6 presentaron valores de 4  $\mu\text{m}$  hasta 2  $\mu\text{m}$ .

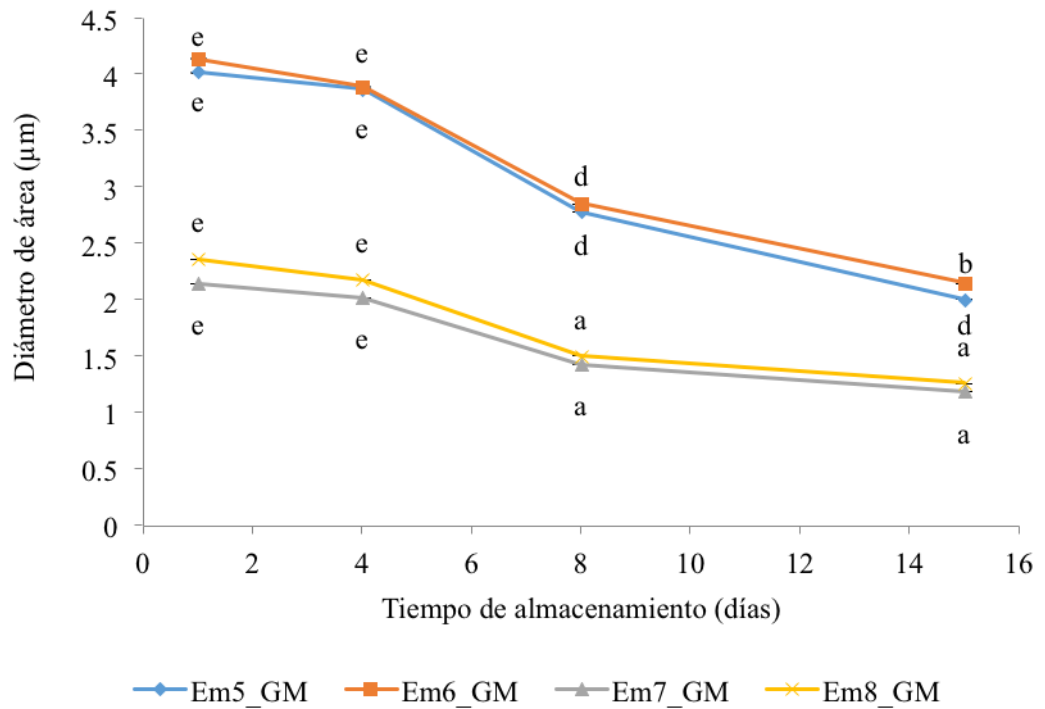


Figura 6. Diámetro promedio volumétrico ( $D_{4,3}$ ) de emulsiones preparadas con GM. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ )

### 7.3.1 Índice de cremado de emulsiones de GM

En los resultados obtenidos se observó que las emulsiones 5 y 6, fueron estadísticamente diferentes en comparación a las emulsiones 7 y 8, observando que las emulsiones que presentaron mayor inestabilidad fueron las emulsiones 6 y 8 con 28.8 y 21.3 %, con una concentración de 20 y 10 % de GM; y una  $\phi$  de 0.1 y 0.2 respectivamente. En el resto de las emulsiones el porcentaje de cremado % fue menor, tal como se observa en la Figura 7.

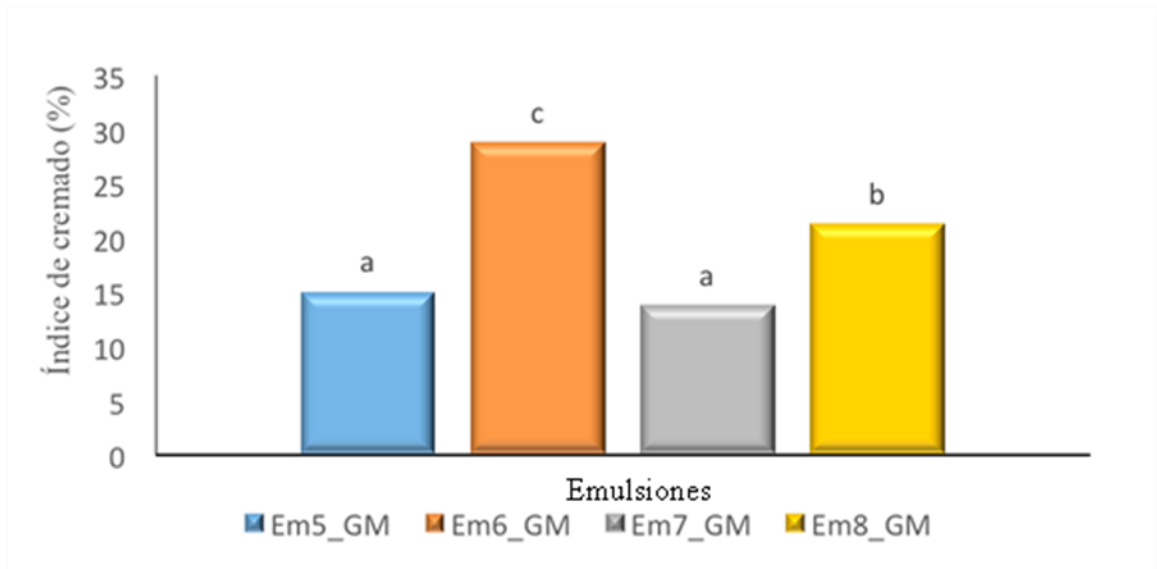


Figura 7. Índice de cremado de las emulsiones preparadas con GM. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ).

En la Figura 8 se muestra como se comportaron las emulsiones de manera visual de acuerdo a su estabilidad con cada una de las concentraciones utilizadas en este estudio.



Figura 8. Imagen de las formulaciones de GM mostrando visualmente el cremado.

### 7.3.2 Tasa de coalescencia de emulsiones de GM

La tasa de coalescencia de las emulsiones elaboradas, se obtuvieron tasas de coalescencia de  $8.00 \times 10^{-7}$  y de  $6.00 \times 10^{-7}$  para las emulsiones 5 y 6 respectivamente, presentando una buena estabilidad con respecto a las emulsiones 7 y 8, con  $3.00 \times 10^{-7}$  y  $3.00 \times 10^{-7}$  respectivamente, presentando mayor inestabilidad.

Tabla 2. Tasa de coalescencia de las formulaciones de GM

	Tasa de coalescencia		
	%	$\phi$	
Em5_GM	20	0.1	8,00E-07
Em6_GM	20	0.2	6,00E-07
Em7_GM	10	0.1	3,00E-07
Em8_GM	10	0.2	3,00E-07

### 7.4 Estabilidad física de las emulsiones de Almidón de Banano (ABN)

Para las emulsiones de ABN con una fracción volumétrica de aceite o fase oleosa ( $\phi$ ) de 0.1 y 0.2 con  $\beta$ -caroteno como fase dispersa, conteniendo en la fase acuosa ABN, se realizó la medición del diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) y del diámetro promedio volumétrico ( $D_{4,3}$ ) para determinar la estabilidad, con respecto al tiempo de almacenamiento. Las concentraciones que se manejaron en las emulsiones evaluadas se conformaron de la siguiente manera: Em1\_ABN al 90 %,  $\phi$  0.1; Em2\_ABN al 80 %,  $\phi$  0.2; Em3\_ABN al 70 %,  $\phi$  0.1 y Em4\_ABN al 60 %,  $\phi$  0.2. Cada una de las emulsiones se analizó directamente después de su preparación.

Con respecto al diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) como se muestra en la Figura 9, las emulsiones preparadas con ABN no presentaron diferencia entre los tamaños de partícula siendo similares los resultados entre las emulsiones y presentando un comportamiento similar con respecto al paso del tiempo evaluado. En el caso de la emulsión 1, presentaron valores al inicio de la evaluación de 20.48  $\mu\text{m}$  y al final del experimento fue de 20.16  $\mu\text{m}$ . El resto de las emulsiones no presentaron diferencia

significativa entre ellas ( $p < 0.001$ ) y su comportamiento fue similar durante el tiempo de almacenamiento.

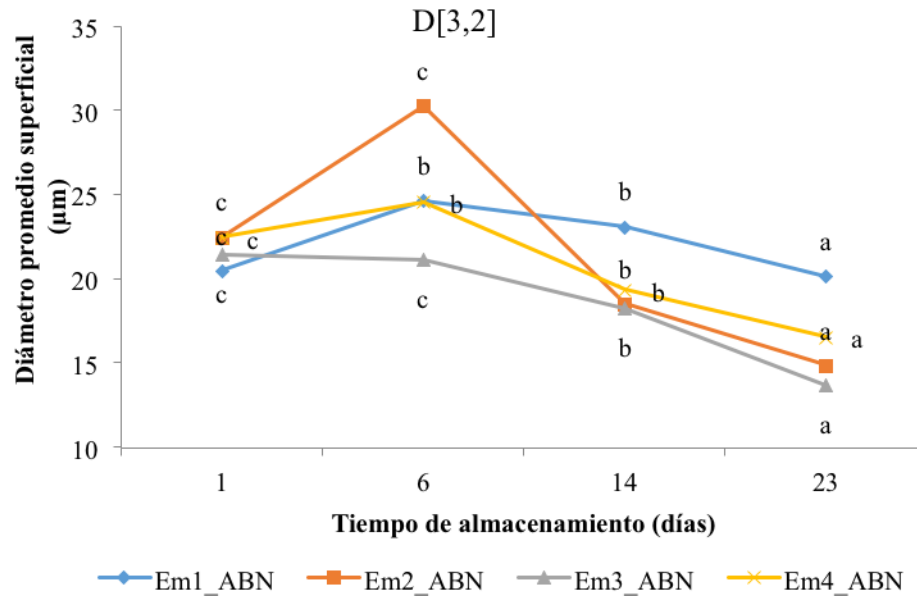


Figura 9. Diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) de emulsiones preparadas con ABN. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ).

Con respecto al diámetro promedio volumétrico ( $D_{4,3}$ ), como se muestra en la Figura 10, se observó que para todas las concentraciones de las emulsiones presentaron tamaños de partículas grandes que iban desde valores de  $50.58 \mu$  hasta  $50.8 \mu$  en el caso de la Em\_1, en relación a las demás concentraciones, se obtuvieron resultados resultados similares.



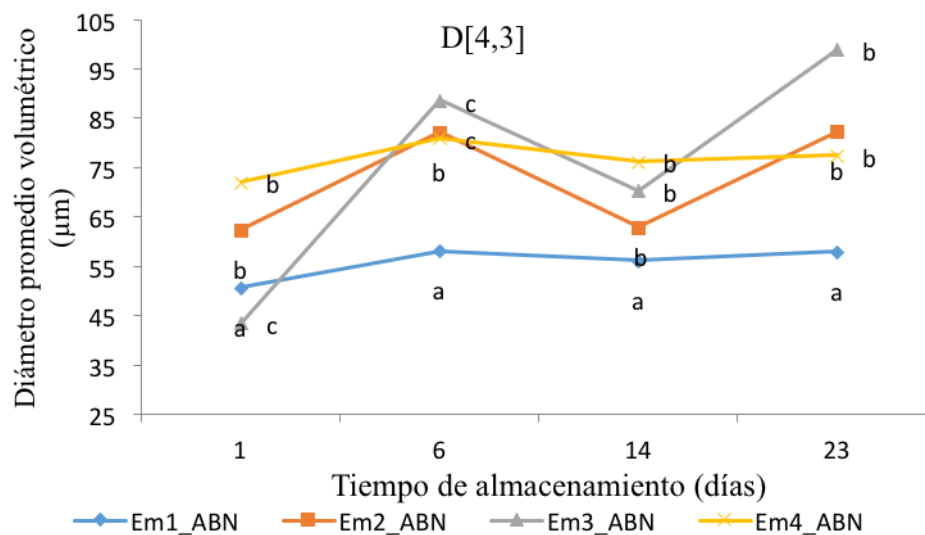


Figura 10. Diámetro promedio volumétrico ( $D_{4,3}$ ) de emulsiones con ABN. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ).

#### 7.4.1 Tasa de coalescencia de emulsiones de ABN

Respecto a la tasa de coalescencia de las emulsiones elaboradas, se valores de  $3.00 \times 10^{-7}$  para las emulsiones 1 y 4 y de  $7.00 \times 10^{-7}$  para las emulsiones 2 y 3 respectivamente, presentando una mayor estabilidad las emulsiones 2 y 3 con respecto al resto de las emulsiones, como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Tasa de coalescencia de las formulaciones de ABN

	Tasa de coalescencia		
	%	$\phi$	
Em1_ABN	20	0.1	3,00E-07
Em2_ABN	20	0.2	7,00E-07
Em3_ABN	10	0.1	7,00E-07
Em4_ABN	10	0.2	3,00E-07

#### 7.4.2 Comparación del Almidón de Banano Nativo (ABN) y Almidón de Maíz Modificado (AMM)

En este apartado se evaluó el comportamiento del almidón nativo de banano y se comparó con almidón de maíz modificado comercialmente. Para ello se prepararon diferentes formulaciones con los dos tipos de almidón, como se muestran en la Tabla 4. Se realizó este ensayo con el objetivo de comparar y evaluar el comportamiento del ABN, utilizando diferentes concentraciones de sólidos y de fase oleosa.

Tabla 4. Formulaciones de ABN comparado con el Almidón de maíz.

Emulsión	ABN %	AMM %	FASE OLEOSA $\Phi$
Em1 ABN	5.0	0.0	0.05
Em2 ABN	3.0	0.0	0.01
Em3 ABN	5.0	0.0	0.05
Em5 AMM	0.0	5.0	0.01
Em6 ABN	3.0	-	0.1
Em7 AMM	0.0	5.0	0.1

En el caso de la comparación de ABN y el AMM, se hicieron siete formulaciones diferentes, en las cuales las concentraciones se muestran en la Tabla 4. Los tamaños de gota y la distribución del ABN y AMM en las emulsiones de aceite en agua (O/W) estabilizadas con  $\beta$ -caroteno, se midieron mediante la difracción láser a durante el tiempo de almacenamiento. Las emulsiones se analizaron directamente después de su preparación como se muestra en la Figura 11, donde se observa la variación del diámetro promedio volumétrico ( $D_{4,3}$ ) de los glóbulos de la emulsión O/W. Los sistemas que presentaron diferencias significativas ( $p < 0.001$ ), obteniéndose un menor diámetro de partícula para las emulsiones 4, 5 y 7 con AMM con una  $\phi$  de 0.05, 0.01 y 0.1, respectivamente. Mientras que los sistemas que presentaron menor estabilidad fueron las

emulsiones 1, 2, 3 y 6, monitoreadas durante 28 días. Las emulsiones que presentaron inestabilidad solo se monitorearon menos días debido a que las emulsiones presentaron complejos que tienden a sedimentarse en la fase acuosa, como se muestra en la Figura 11. Con estos resultados se demuestra que el almidón de banano nativo es un compuesto menos eficiente debido a que las condiciones del proceso reducen su uso en aplicaciones industriales debido a su fragilidad, el deterioro de las propiedades mecánicas a condiciones ambientales por la exposición con la humedad, la reducida procesabilidad debido a su alta viscosidad, su incompatibilidad con algunos solventes y polímeros, descomposición térmica, alto nivel de retrogradación y sinéresis, por lo cual, requieren de una modificación de las inconvenientes propiedades físicas y químicas del almidón (Peñaranda et al., 2008).

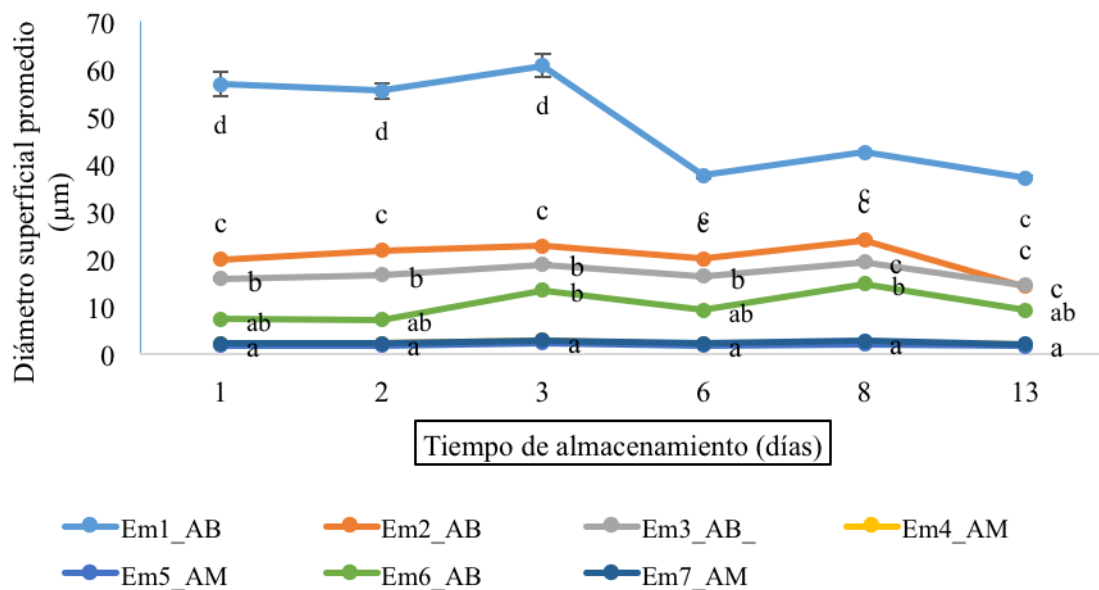


Figura 11. Diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) de emulsiones preparadas con ABN. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ).

### 7.4.3 Índice de cremado de las emulsiones preparadas con ABM y AMM

Con respecto al índice de cremado de las emulsiones de ABN y AMM, presentaron la misma tendencia de inestabilidad las emulsiones de ABN, en comparación con las emulsiones de AMM. La emulsión 2 de ABN fue la que presentó

mayor inestabilidad con un valor de 12.5 %, mientras que las emulsiones 1, 3 y 6 presentaron índice de cremado pero menor que la emulsión 2. Esta misma tendencia se presenta por la característica del almidón nativo de banano como se muestra en la Figura 12.

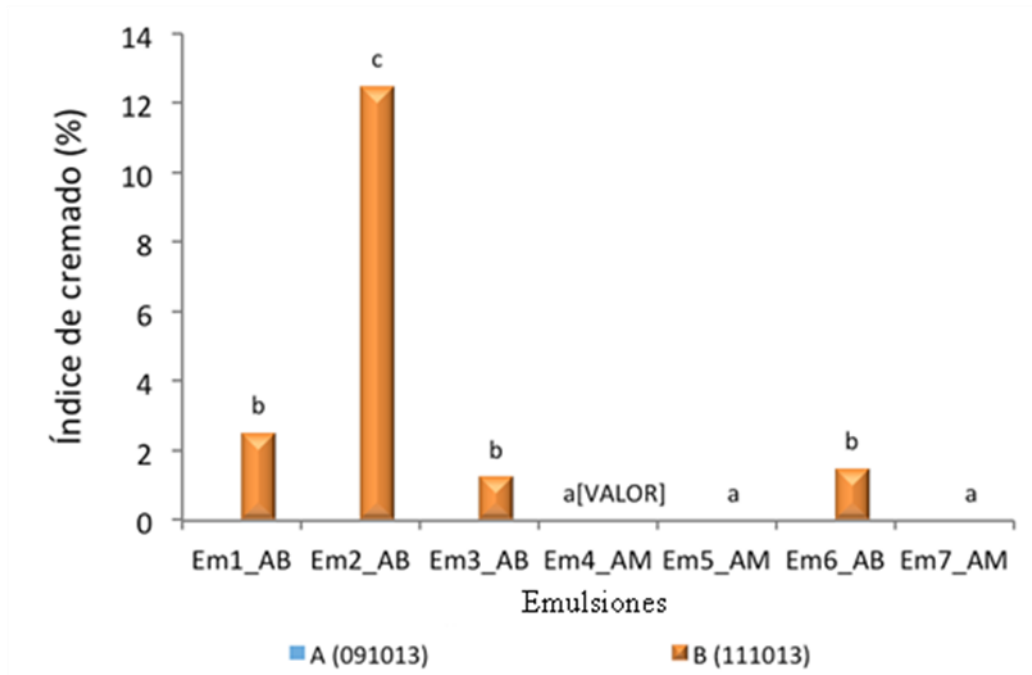


Figura 12. Índice de cremado de las emulsiones preparadas con ABM y AMM. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) .

De la misma forma, al monitorear los sistemas se observó de manera visual el comportamiento de las emulsiones antes mencionadas, con el objetivo de identificar la desestabilización del sistema mediante la formación o separación visible de fases, de manera simple y directa, como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Imagen de las formulaciones de ABN y AMM mostrando visualmente el comportamiento de las mismas.

### **7.5 Modificación del Almidón de Banano Nativo por el método de OSA**

El comportamiento de los sistemas seleccionados para el presente estudio se determinó comparando las emulsiones preparadas con ABN, ABM y AMM. Para ello se realizaron diferentes formulaciones con las concentraciones que se muestran en el Tabla 5.

La modificación del almidón de banano (método de succinación por el reactivo OSA; octenyl succinil anhidro) se realizó para la posterior elaboración de las emulsiones, y para comprobar si dicha modificación ayudaba a mantener su estabilidad. Las emulsiones elaboradas fueron de aceite en agua (O/W), y comparables con las diferentes matrices biopoliméricas (almidón de banano nativo y almidón de maíz modificado). Los resultados obtenidos en los tamaños de gota y la distribución del ABN, ABM y del AMM en las emulsiones de aceite en agua (O/W) estabilizadas con  $\beta$ -caroteno, se midieron mediante a durante el tiempo de almacenamiento.

Tabla 5. Formulaciones de ABM, ABN, AMM con diferentes concentraciones de almidón y fase oleosa.

<b>Emulsión</b>	<b>ABN</b>	<b>ABM</b>	<b>AMM</b>	<b><math>\Phi</math></b>	<b>Temperatura</b>
	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>		<b>°C</b>
Em1 ABM	0.0	5.4	0.0	0.05	90
Em2 ABM	0.0	5.4	0.0	0.1	90
Em3 ANB	5.4	0.0	0.0	0.05	90
Em4 ANB	5.4	0.0	0.0	0.1	90
Em5 AMM	0.0	0.0	5.4	0.05	90
Em6 AMM	0.0	0.0	5.4	0.1	90
Em7 ABM	0.0	5.4	5.0	0.05	25
Em8 ABM	0.0	5.4	0.0	0.1	25
Em9 ANB	5.4	0.0	0.0	0.05	25
Em10 ANB	5.4	0.0	0.0	0.1	25
Em11 AMM	0.0	0.0	5.4	0.05	25
Em12 AMM	0.0	0.0	5.4	0.1	25

### 7.5.1 Tamaño de partícula de emulsiones de ABN, ABM y AMM a 25 °C

Las emulsiones se analizaron inmediatamente después de su elaboración, como se muestra en la Figura 14, donde se observa la variación del tamaño de acuerdo al diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) de los sistemas evaluados (emulsión O/W). Una característica importante en este apartado es que se utilizaron como diferencia las temperaturas, de las cuales se elaboraron emulsiones a temperatura ambiente (25 °C) y otras aplicando calor (90 °C).

Con respecto al diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) de las emulsiones que fueron preparadas a 25 °C, los sistemas que presentaron una diferencia del diámetro fueron la emulsión de AMM con 17.7  $\mu\text{m}$  al inicio de la evaluación finalizando con 21.8  $\mu\text{m}$  con  $\phi$  de 0.1, seguida de la emulsión de ABM con  $\phi$  de 0.1, con valores de 33.58  $\mu\text{m}$  al inicio de la evaluación y con 42.16  $\mu\text{m}$  al final de la misma. Mientras que el sistema

que presentó menor estabilidad fue la emulsión de ABN con  $\phi$  de 0.1 con valores desde 40.82  $\mu\text{m}$  hasta 47.06  $\mu\text{m}$ .

Lo anterior se debe a que los gránulos de almidón son insolubles en agua fría debido a los enlaces de hidrógeno y cristalinidad de la molécula. Cuando almidón se dispersa en agua caliente debajo de su  $T_g$ , los gránulos de almidón se hinchan y aumentan en tamaño, rompiendo las moléculas y, en consecuencia, la lixiviación de amilosa forma una red tridimensional y aumenta la viscosidad de la pasta (Sarker et al., 2013). El tratamiento de AMM presentó mejor estabilidad con respecto al tiempo, siendo diferente estadísticamente ( $p < 0.001$ ), en comparación a la emulsión de ABN quien fue que presentó resultados con tamaño de partícula más grandes (Figura 14).

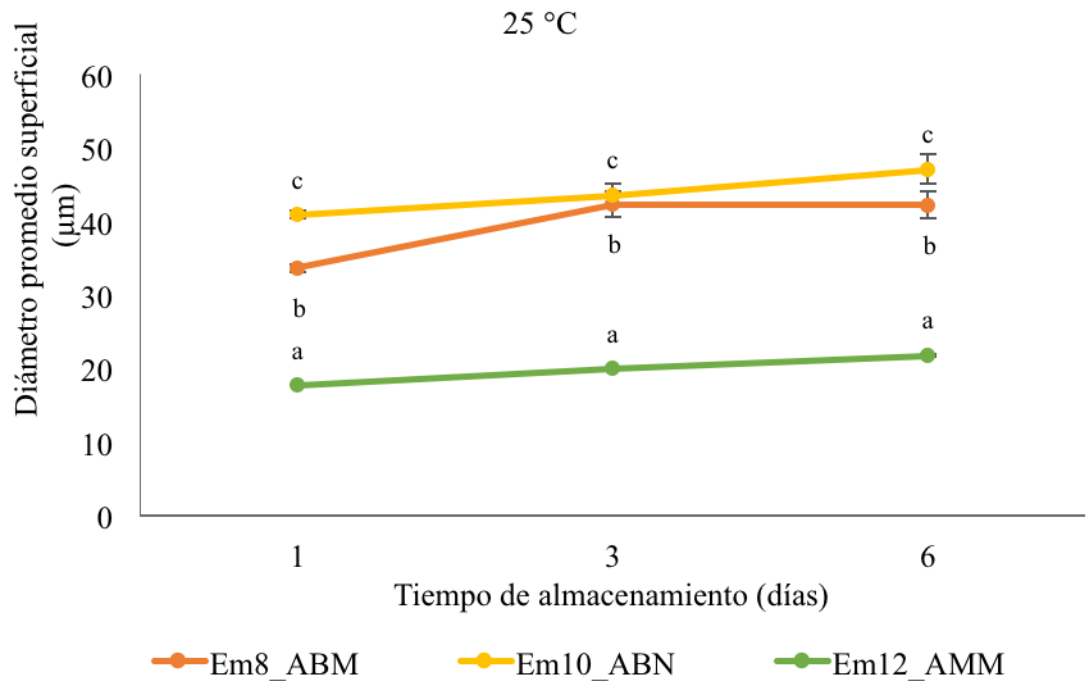


Figura 14. Diámetro promedio superficial de ABN, ABM y AMM elaboradas a 25. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ).

El almidón nativo requiere de agua caliente para poder absorberla debido a la compactación estructural y a los enlaces de hidrógeno de las moléculas dentro del gránulo. Después de la modificación, el efecto de repulsión entre los grupos incorporados facilita la penetración del agua del gránulo, además de que la modificación

también contribuye al aumento de la capacidad de absorción (Landerito y Wang, 2005). Por su tamaño y complejidad, el gránulo de almidón crudo no es digerible por el organismo humano debido a su estructura semicristalina, por lo cual se deben utilizar procesos calor-humedad para transformarlo (Kawaljit y Narpinder, 2007).

Así mismo, se determinó el índice de cremado, en donde las emulsiones que mostraron diferencia fueron aquellas elaboradas con almidón de banano tanto modificado como nativo. Siendo el ABM quien presentó mayor índice de cremado con un valor de 62.2 % con  $\phi$  de 0.1 seguido del ABN con 43.75 % con  $\phi$  de 0.1. El resto de las emulsiones presentaron valores de 0 % de cremado.

### **7.5.2 Tamaño de partícula de las emulsiones de ABN, ABM y AMM a 90 °C**

Con respecto al diámetro promedio superficial ( $D_{3,2}$ ) de las emulsiones de ABM, ANB y AMM (Figura 15), los resultados obtenidos mostraron que la emulsión con el ABM fue diferente estadísticamente ( $p < 0.001$ ) con un valor inicial de 3.66  $\mu\text{m}$ , al final del experimento presentó un tamaño de partícula de 4.85  $\mu\text{m}$ , mientras que la emulsión con ABN presentó un resultado al inicio del monitoreo de 19.18  $\mu\text{m}$  y al final aumento su valor hasta 26.7  $\mu\text{m}$ , mientras que el almidón de maíz modificado presentó valores mayores en comparación a las emulsiones de ABN, estos datos nos dan a entender que el método de modificación del almidón de maíz permite que a temperatura ambiente el gránulo del almidón de maíz tenga más capacidad de absorber el agua hasta romperse y gelificar, por lo tanto al aplicarle temperatura este se desestabiliza presentando tal comportamiento. La gelatinización es quizá la transición más importante del almidón. Es una transición de orden-desorden que sufren los polímeros de almidón sometidos a procesos de calentamiento lo cual tiene gran impacto en el procesamiento, calidad y estabilidad de los productos basados en almidón (Kawaljit y Narpinder, 2007).

Así también, con respecto a los resultados donde el almidón de banano modificado (ABM) fue diferente estadísticamente ( $p < 0.001$ ) presentando mejor estabilidad en comparación al almidón de banano nativo (ABN), esto se debió a que la acción al modificar el almidón de banano ayudó a que se agregaran grupos hidrofílicos. Por lo tanto, la modificación química implica la introducción de grupos funcionales en la



molécula de almidón sin afectar la morfología o la distribución del tamaño de los gránulos.

Las modificaciones químicas generan cambios significativos en el comportamiento del almidón, la capacidad de gelatinización, la retrogradación y las propiedades de la pasta (López et al., 2010). Con el aumento de la temperatura hasta 90 °C, la capacidad de unión con el agua tiene una tendencia a aumentar. A 90 °C, el almidón modificado ha demostrado tener una capacidad de unión al agua superior al 50 % que el almidón nativo (Krzysztof et al., 2003).

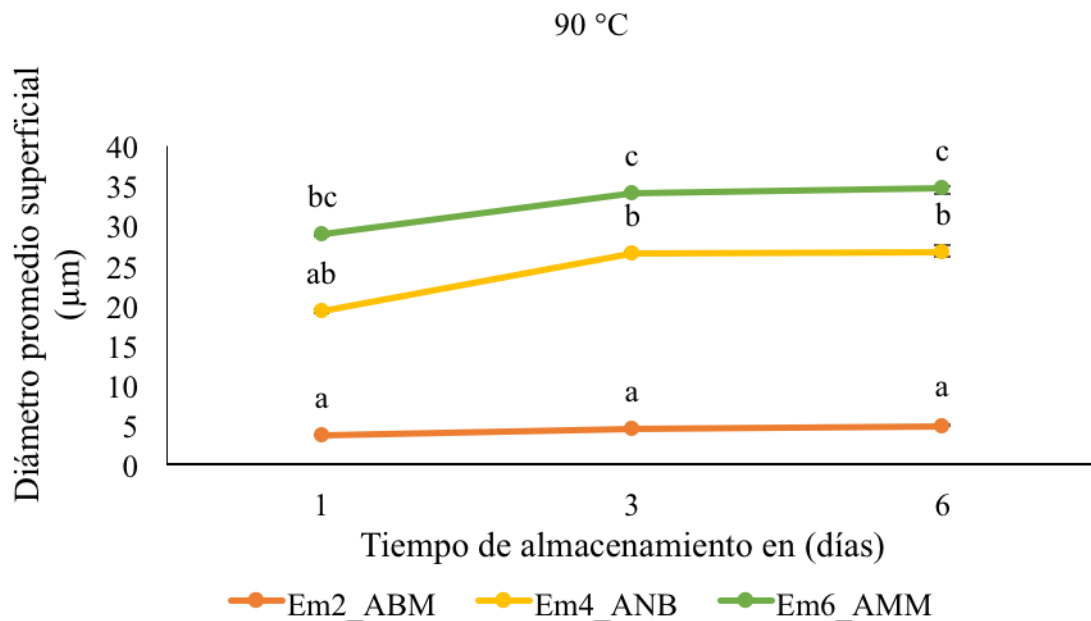


Figura 15. Diámetro promedio superficial de las emulsiones preparadas con ABM, ANB y AMM. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ).

Los gránulos de almidón no son solubles en agua fría debido a los fuertes enlaces de hidrógeno entre cadenas que sujetan las cadenas de almidón juntos. Sin embargo, cuando el almidón se calienta en agua, la estructura cristalina se rompe y las moléculas de agua interaccionan con los grupos hidroxilo de amilosa y amilopectina, lo que produce la solubilización parcial del almidón (Sánchez et al., 2015).

Debe señalarse otra propiedad importante de estos almidones, la estabilidad que exhiben a temperaturas elevadas ( $> 90$  °C), es decir, mantienen la viscosidad después de

alcanzado el pico máximo, etapa en la curva de viscosidad en que se sostiene el esfuerzo cortante a la temperatura de 95 °C. Esta propiedad es útil en los procesos tecnológicos que involucren el bombeo en caliente del almidón gelatinizado, ya que no habrá disminución en la viscosidad debido a la desintegración de los gránulos (Martínez et al., 2015). Según los resultados obtenidos, el comportamiento del almidón nativo de banano de las variedades estudiadas, puede ser incorporado en la elaboración de alimentos que demanden características tecnológicas funcionales deseables como agentes espesantes, gelificantes y estabilizantes a temperaturas de gelatinización mayores a 68 °C.

Después de la modificación química, los almidones OSA son efectivos emulsificantes debido a la adición de grupos bifuncionales (hidrofóbicos e hidrofílicos), característica necesaria para la retención de aceite durante la encapsulación (Tesch et al., 2002). Las diferencias entre los valores de la modificación reportados por otros autores y los encontrados en este trabajo pueden ser debidas a diferencias en las condiciones de la modificación, fuente de los almidones, métodos de análisis, al tipo y concentración empleada en los reactivos.

## **7.6 Digestión *in vitro* de emulsiones de GA y GM**

Para la digestión *in vitro* de las emulsiones de GA, en la cual se evaluó desde la fase inicial, boca, estomago e intestino delgado. Se determinó su estabilidad midiendo el tamaño de partícula y se observó que en el caso de la emulsión de GA fueron las que presentaron mejor estabilidad al 20 % con valores de 1.01  $\mu\text{m}$  para la fase de la boca y para la fase del estómago, y de 1.03  $\mu\text{m}$  para la fase del intestino delgado. Para el caso de la emulsión de GA al 10 %, se determinaron los valores de 2.23  $\mu\text{m}$  en la fase inicial y aumentando hasta 3.6  $\mu\text{m}$  en la fase final que es la del intestino delgado, como se observa en la Figura 16.

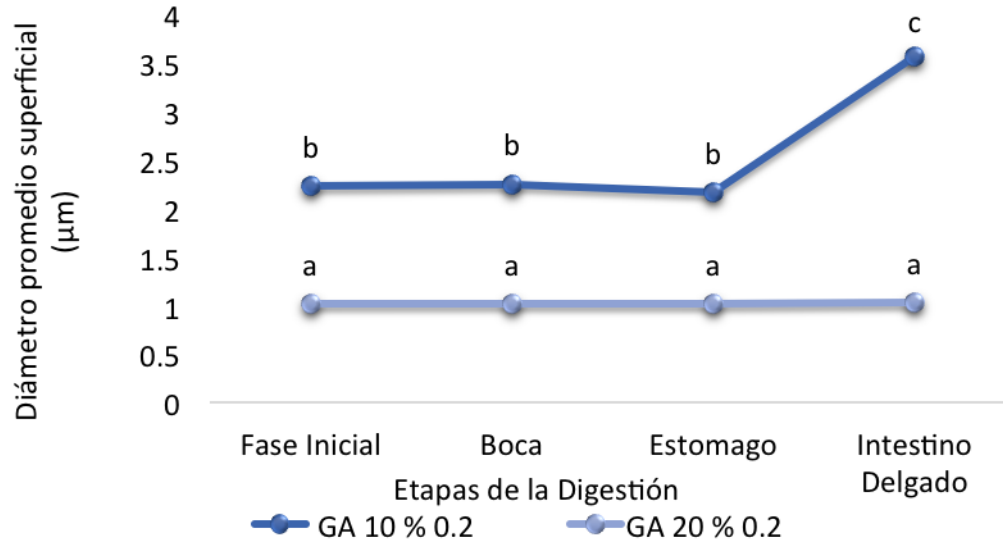


Figura 16. Digestión *in vitro* de las emulsiones de GA al 10 y 20 %. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ).

Probablemente el tamaño de gota en las emulsiones de goma arábiga al 20 % no cambie ya que la concentración es mayor en comparación con la del 10 % y las enzimas del tracto gastrointestinal no pueden atacar tan fácilmente (Steffolani et al., 2017).

Así mismo, para las emulsiones de GM al 10 y 20 %, se observó que en el caso de la emulsión de GM al 10% se obtuvieron valores de 3.09 µm en la fase inicial y al final de la digestión se obtuvieron valores similares. Con respecto a las emulsiones con 20 % de GM, tampoco presentaron diferencias en las cuatro fases de la digestión manteniéndose resultados similares (Figura 17). Los cambios observados en las distribuciones de tamaños de gota de las emulsiones de ABN y ABM, podrían atribuirse a la digestión y al desplazamiento de los revestimientos del almidón adsorbidos debido a la presencia de pepsina. Estudios previos han demostrado que el componente estomacal simulado puede interactuar con la superficie de las gotitas en emulsiones y cambiar las distribuciones de tamaño de gota (Bauer et al., 2005).

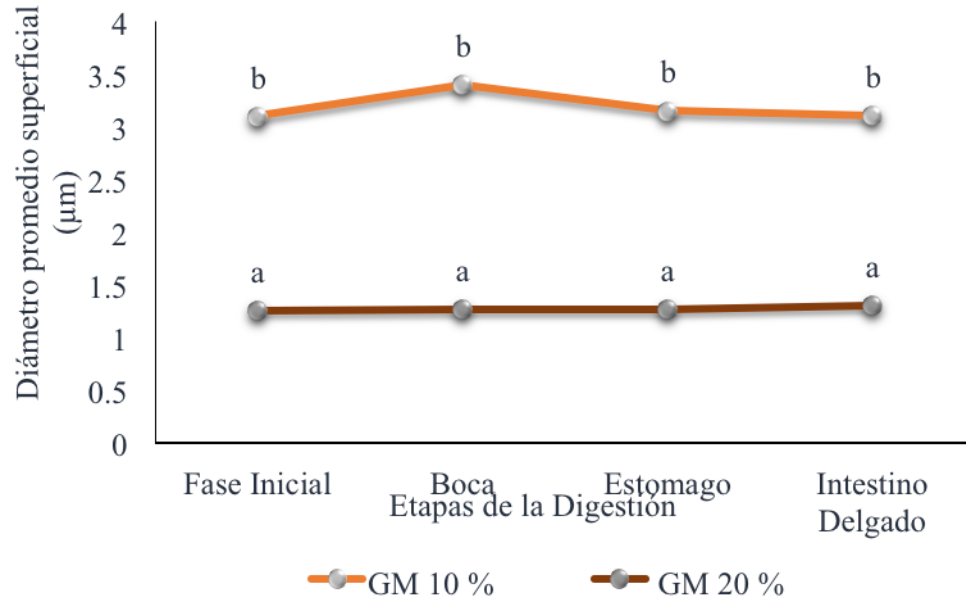


Figura 17. Digestión *in vitro* de las emulsiones de GA al 10 y 20 %. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ).

Se compararon los resultados de GA y GM al 10 % con una emulsión de proteína de leche (PL) para ver si había algún cambio con respecto al tamaño de partícula, y se observó que se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) entre los resultados con PL, ya que presentaron valores de  $3.7 \mu\text{m}$  en la fase inicial y llegando hasta la fase del intestino delgado de  $4.24 \mu\text{m}$ , esto debido a las enzimas que fraccionan las proteínas de la emulsión (Figura 18). La proteína de leche es capaz de formar pequeñas gotas, y que se adsorben rápidamente ayudando a la formación de emulsiones estables (Hur et al, 2009). Con respecto a la emulsión de GA se observó que en la fase el intestino delgado hasta la fase del estómago presentó un comportamiento similar, cuando paso a la fase del intestino delgado presento un aumento de tamaño de partícula significativo de  $3.56 \mu\text{m}$ , siendo esta fase donde se encontraban las enzimas que hicieron que se digirieran las partículas de la emulsión y se liberara el compuesto.

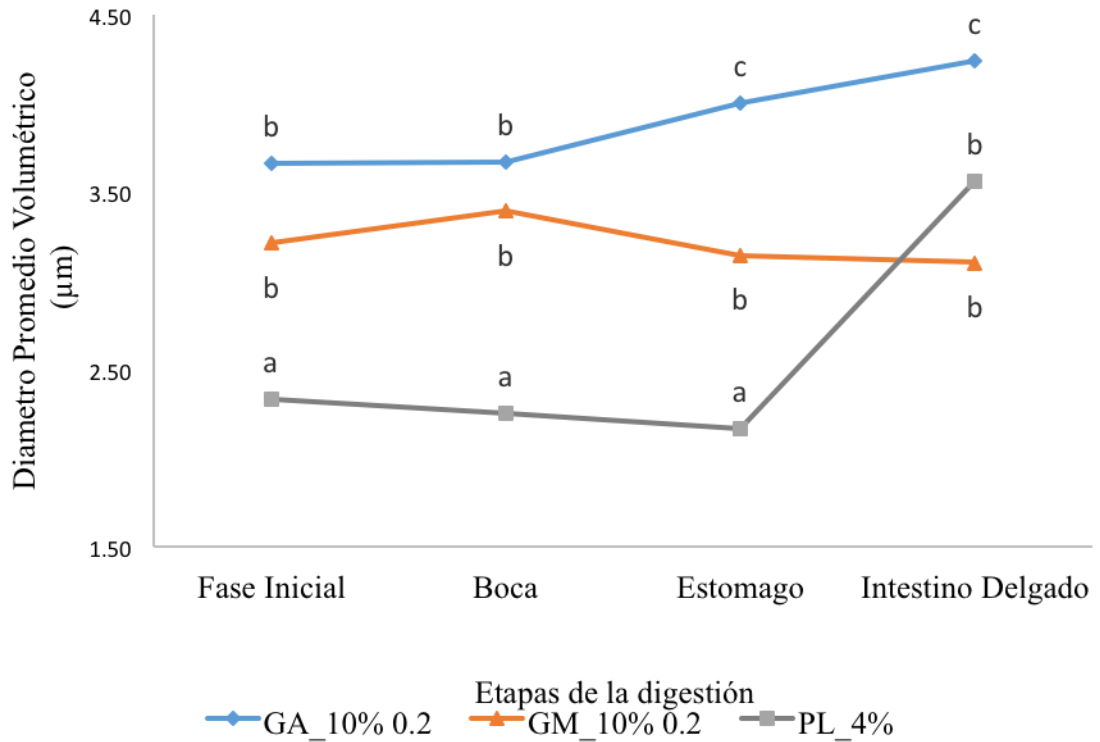


Figura 18. Digestión *in vitro* de las emulsiones de GA, GM y PL. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ )

Con respecto a la digestión *in vitro* de las emulsiones con ABM, ABN y AMM (Figura 19), se obtuvieron resultados los cuales demostraron que el ABM presentó un comportamiento similar desde la fase inicial a la fase final de la digestión que fue en el intestino delgado con un valor inicial de 1.31  $\mu\text{m}$  hasta 1.17  $\mu\text{m}$  que fue diferentes estadísticamente ( $p < 0.001$ ), mostrando tamaños de partículas más pequeños en comparación con el del AMM que mostró valores de 10.54  $\mu\text{m}$  en la fase inicial y 7.19  $\mu\text{m}$  en la fase del intestino delgado. Cuando las emulsiones iniciales pasaron al modelo de la boca simulada, no hubo cambios significativos en el tamaño promedio de gotas y distribuciones. La falta de cambios en el tamaño de la gota podría ser debido a que los fluidos orales simulados utilizados en el estudio no contienen cantidades significativas de componentes activos de superficie que podrían desplazar a los emulsionantes, y no contienen enzimas que pueden digerir este tipo de emulsionantes (Xu et al., 2014). Así también, la cinética de la digestión del almidón puede ser afectada por varios factores,

como la naturaleza del almidón, la presencia de fibra, antinutrientes y los cambios de las interacciones que tienen lugar durante el procesamiento, por lo que el almidón presente en los alimentos no es completamente digerido (Singh, Dartois y Kaur, 2010).

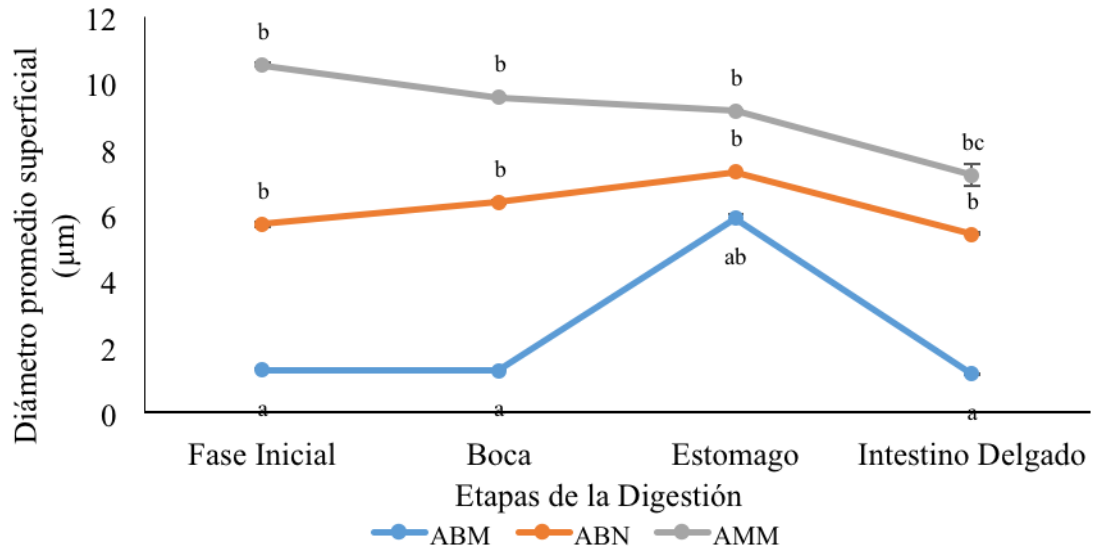


Figura 19. Digestión *in vitro* de las emulsiones de ABM, ABN y AMM. Letras diferentes representan diferencias significativas ( $p < 0.001$ ).

Una mayor temperatura aumenta la digestión del almidón, debido a que promueve la despolimerización de los materiales sometidos a los diferentes procesos de cizallamiento, facilitando la acción de las enzimas a cadenas más disminuidas. La temperatura promueve la destrucción de los dominios cristalinos nativos y junto con el tiempo de residencia ayuda a la formación de complejo amilosa-lípido. Es importante en la despolimerización del almidón y de la goma guar, afectando su interacción y el desarrollo de la viscosidad. Esto implicaría que la barrera formada por la goma guar para impedir la digestión del almidón no sea significativa (Parada et al., 2011). Probablemente, el menor porcentaje de hidrólisis del almidón de las emulsiones de ABM se deba a que el almidón se encuentra gelatinizado, y está más expuesto al ataque de las enzimas del tracto intestinal, mientras que el ABN se encuentra empaquetado dentro de los gránulos, quedando menos disponible a la acción enzimática (Steffolani et al., 2017).

Por otra parte, el almidón nativo presenta una porción de almidón resistente ya que es la fracción principal de los almidones de plátano sin gelatinizar, la digestión de

los almidones nativos de plátano sin cocinar se puede atribuir a la longitud de la cadena, y estructura semicristalina de la amilopectina (Moreno y Dufour, 2016). Adicionalmente, el almidón resistente exhibe un nivel de digestibilidad lenta y puede ser utilizado como un vehículo para la liberación lenta de la glucosa. También, como fibra insoluble, tiene un impacto positivo en la salud del colon por el incremento de la tasa de producción de células, disminuye la atrofia epitelial del colon en comparación con dietas sin fibra, influye en la tumorigénesis, reducen el colesterol y los triglicéridos séricos (Pérez, 2007).

## **7.7 Caracterización física del almidón modificado**

### **7.7.1 Evaluación de la forma y tamaño de los gránulos de almidón por medio de la Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

Al evaluar 3 aumentos (500X, 1000X y 1500X) de las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), se pudo observar que los gránulos de almidón presentan formas irregulares de óvalos alargados y formas esferoidales. Se han reportado formas similares de los gránulos de almidón, así como también se observaron gránulos de almidón dañados, pero la cantidad está por debajo del 1 % y significa que la técnica de preparación del almidón no causó daño a los gránulos (Bello et al., 2000).

El rango de tamaño de los gránulos varió desde 20 hasta 50  $\mu$ , siendo el tamaño promedio 33  $\mu$  (Figura 20 a-b y Figura 21 c-d). El almidón de banano tiene gránulos grandes, comparables a los de los almidones de raíces y tubérculos, que son más grandes que los almidones de semillas o cereales. Algunos gránulos de papa pueden medir hasta 100  $\mu$ m en su eje mayor. El tamaño promedio de un gránulo de almidón de maíz es de 15  $\mu$ m (Krzysztof et al., 2003). Lii et al., (1982) reportaron un rango de tamaño de 6  $\mu$  hasta 80  $\mu$ , con la mayoría entre 20  $\mu$  y 60  $\mu$ . Por otro lado, Bonilla y Morúa (2001) encontraron un rango menor, desde 10  $\mu$  hasta 23.3  $\mu$ m.

Las Figuras 20a y 20b muestran las microfotografías tomadas de los gránulos del almidón de banano nativo y las micrografías (Figuras 21a-b) son de los gránulos de almidón de banano modificado, en donde se observó que el almidón nativo presentaba

superficies lisas mientras que, en el almidón modificado, se observaban grietas que se formaron por la modificación con el método OSA. La diferencia estructural visible entre las muestras fue su morfología superficial debido a la presencia de abolladuras y grietas, así como su tamaño de partícula; este tipo de imperfecciones fueron reportadas por Bae y Lee, 2008, quien encapsuló aceite de aguacate con diferentes concentraciones de maltodextrinas y proteína, encontrando características similares en su ensayo.

Otros estudios también han mostrado estas características de superficie obtenidas mediante secado por aspersión, en donde han propuesto que la depresión superficial o colapso estructural y la aglomeración de partículas de polvo, están relacionadas con la transición vítrea y la cristalización de la matriz del carbohidrato amorfo de partículas de polvo; además, los mecanismos asociados con la formación de espacios vacíos dentro de las partículas están relacionadas con el movimiento del material en la última etapa del proceso de secado por aspersión (Chiou y Langrish, 2007).



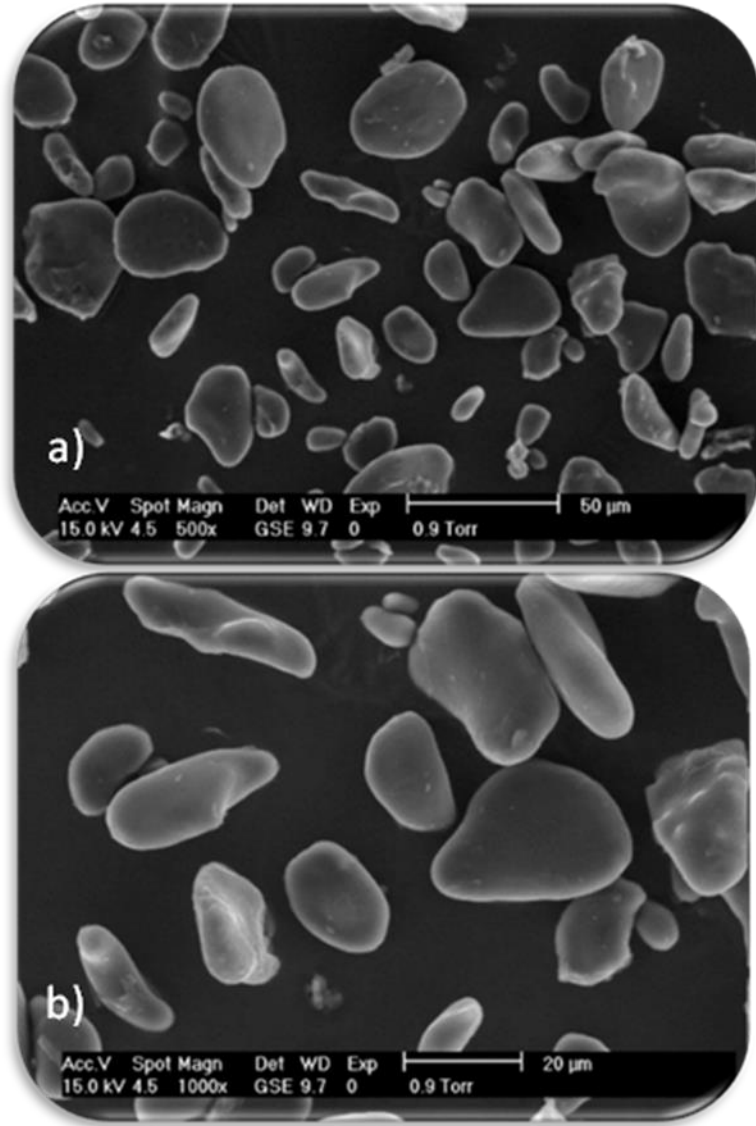


Figura 20. Microfotografías de los gránulos del almidón de banana nativo. 20a): 500X, 20b) 1000X

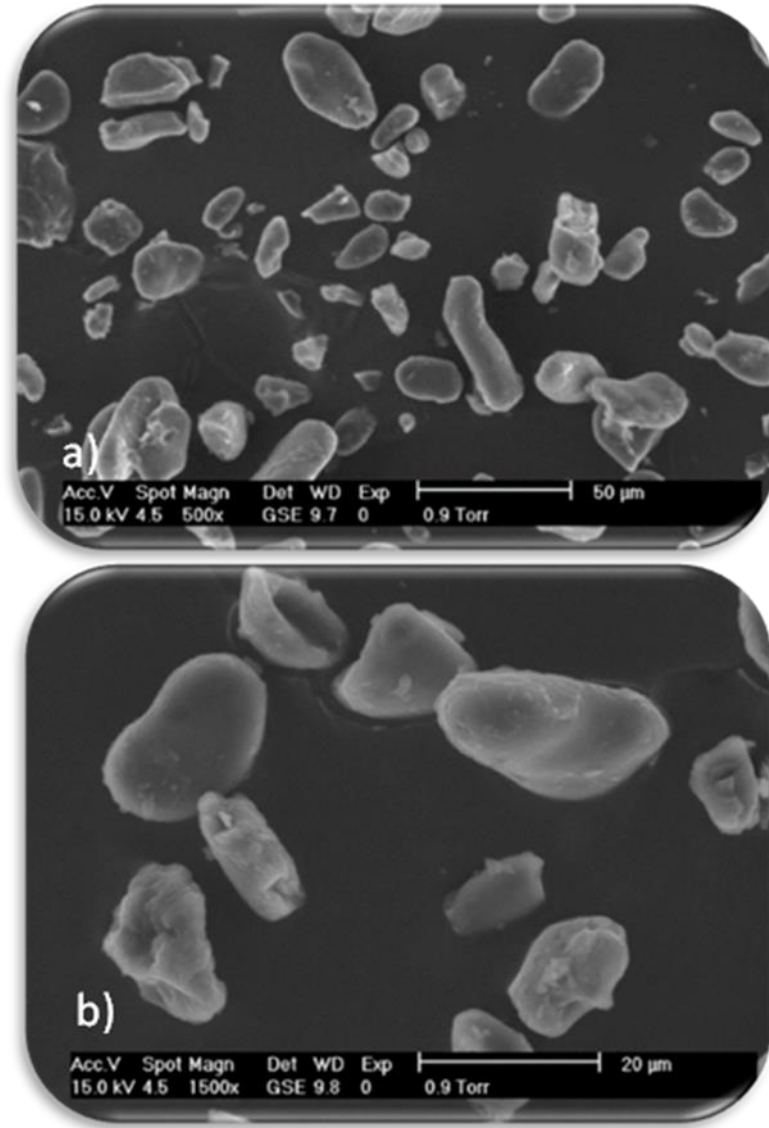


Figura 21. Microfotografías de los gránulos del almidón de banana modificado. 21a): 500X y 21b): 1500 X.

### 7.7.2 Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier de almidones nativos y modificados (FT-IR)

La comparación entre los espectros infrarrojos de los almidones nativos y modificados de las variedades de banana mostró una similitud entre sus bandas (Figura 21), en la cual se observan bandas de vibración típicas, que corresponden a la elongación (estiramiento) de los principales grupos característicos de la molécula de almidón de

banano a una longitud de onda de  $2358\text{ cm}^{-1}$ , característica del estiramiento de los grupos (-OH), y señales en el intervalo de  $2200$  al  $2500\text{ cm}^{-1}$  que corresponden al estiramiento de los enlaces carbono oxígeno (C=O), así como también, el estiramiento en los enlaces de carbono (C=C) en la región  $996$  señales en el intervalo de  $900$  al  $1200\text{ cm}^{-1}$ . Así mismo, en el almidón de banano modificado se observó, que en la mayoría de las bandas mostradas en la figura mostraron estiramientos en todo el intervalo. De acuerdo con la literatura existen pocos estudios sobre la reacción OSA en este tipo de almidón. Zhu et al., (2011), reportó que, para almidones de diferentes fuentes botánicas, modificados con químicamente con el compuesto OSA se presenta una banda entre  $1723$  y  $1726\text{ cm}^{-1}$ , sugiriendo que la formación de grupos éster carbonilo del grupo OSA, y que la intensidad de la banda de absorción aumenta de acuerdo al valor de sustitución.

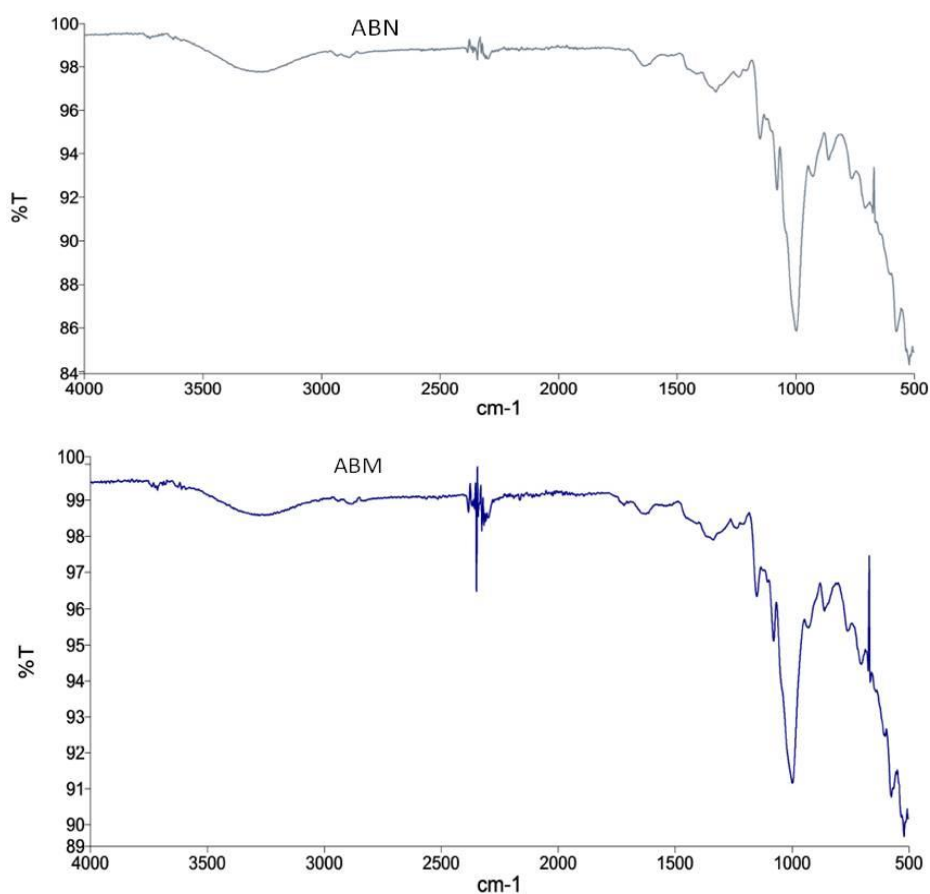


Figura 22. Comparación de los espectros por FT-IR de ABN y ABM.

## 8. CONCLUSIONES

- Las emulsiones elaboradas con GA al 20 % con  $\phi$  0.1 y 0.2, presentaron un menor diámetro promedio superficial (D 3,2), mostrando estabilidad.
- Las emulsiones elaboradas con GM al 20 % y  $\phi$  0.1 y 0.2, presentaron mayor estabilidad respecto a las elaboradas con otras concentraciones.
- El índice de cremado y la tasa de coalescencia que se determinó en las emulsiones con 20 % de GA, GM, presentó los valores más bajos, indicando una mayor estabilidad de las emulsiones. Para las de AB fue de 7.5 %, y 0 % para las de almidón modificado comercial.
- Al aumentar las concentraciones de la GA y GM de un 10 a un 20 %, mejoró la estabilidad de las emulsiones, la  $\phi$  de la fase oleosa no presentó interferencia en los resultados obtenidos.
- Las emulsiones elaboradas con almidón nativo presentaron valores promedio superficial de 60  $\mu\text{m}$  con una concentración de sólidos del 5.0 %  $\phi$  0.1, mostrando inestabilidad.
- El almidón de maíz comercial fue muy estable de acuerdo a los resultados obtenidos de tamaño de partícula, índice de cremado y tasa de coalescencia.
- La modificación del almidón de banano por el método de succinatación (OSA) mejoró la estabilidad de las emulsiones respecto a las elaboradas con almidón nativo.
- Las emulsiones GA y GM que presentaron mejor liberación del carotenoide en la digestión *in vitro* fueron las que contenían 10 % de sólidos.
- En la digestión *in vitro* de las emulsiones de ABN, ABM y de almidón de maíz comercial, se encontró una estabilidad del sistema, sin embargo, la liberación fue menor en relación a la emulsión del almidón de maíz comercial.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar R, Fávoro T. y Ferreira G. 2012. Microencapsulation of lycopene by spray drying: characterization, stability and application of microcapsules. *Food and Bioproducts Processing*. 90: 37-42.
- Aparicio S, Flores H, Tovar J, García S, Gutiérrez M. y Bello P. 2005. Resistant starch rich powders prepared by autoclaving of native and limerized banana starch: partial characterization. *Starch/Stärke*. 57, 405-412.
- Aparicio T. 2003. Comportamiento fisicoquímico y reológico de los almidones nativos y modificados de yuca (*Manihot esculenta*), camote (*Ipomoea batata* (L) AM) y plátano Enano (*Musa cavendish*). Reporte Técnico SIGOLGO-CONACYT 97-01-004-T.
- Araneda C. y Valenzuela F. 2009. Microencapsulación de extractantes: una metodología alternativa de extracción de metales. *Revista Ciencia Ahora*. 22(11): 9-19.
- Arias P, Dankers C, Liu P. y Pilkauskas P. 2004. La economía mundial del banano, 1985-2002. Servicio de materias primas, productos tropicales y hortícolas. Dirección de productos básicos y comercio. Roma.
- Atmane M, Jacquot M, Scher J. y Desobry S. 2006. Flavor encapsulation and controlled released-a review. *International Journal of Food Science and Technology*. 41: 1-21. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.019>.
- Bae E. y Lee S. 2008. Microencapsulation of avocado oil by spray drying using whey protein maltodextrin. *Journal of Microencapsulation*. 25(8): 549-560.
- Balasubramani P, Viswanathan R. y Vairamani M. 2013. Response surface optimization of process variables for microencapsulation of garlic (*Allium sativum* L.) oleoresin by spray drying. *Biosystems Engineering*. 114(3): 205-213.
- Barbosa C, Ortega R, Juliano P. y Yan H. 2005. Food powders: Physical properties, processing and functionality. Kluwer Academic/Plenum Publishers. New York.
- Bauer E, Jakob S. y Mosenthin R. 2005. Principles of physiology of lipid digestion. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 18(2): 282-295.
- Bello P, Romero R. y Paredes O. 2000. Preparation and properties of physically and chemically modified banana starch prepared by alcoholic-alkaline treatment.

Starch. 52: 154-159. DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/1521-379x\(200006\)52:5<154::aid-star154>3.0.co;2-#](http://dx.doi.org/10.1002/1521-379x(200006)52:5<154::aid-star154>3.0.co;2-#)

- Bello P. 2002. Propiedades químicas y funcionales del almidón modificado de plátano *Musa paradisiaca* L. (var. Macho). *Agrociencia*. 36: 169-180.
- BeMiller J. 2009. One hundred years of commercial food carbohydrates in the United States. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 57: 8125-8129.
- Beristain C, Azuara E, García H. y Vernon C. 1996. Kinetic model for water/oil absorption of mesquite gum (*Prosopis juliflora*) and gum arabic (*Acacia senegal*). *International Journal of Food Science and Technology*. 31: 379-386.
- Bernstein P, Li B, Vachali P, Gorusupudi A, Shyam R, Henriksen B, y Nolan J. 2015. Progress in retinal and eye research lutein, zeaxanthin, and meso-zeaxanthin: The basic and clinical science underlying carotenoid-based nutritional interventions against ocular disease. *Progress in Retinal and Eye Research*. 50: 34–66.
- Betancur A, Gallegos T, Chel G. 2004. Wet-fractionation of *Phaseolus lunatus* seeds: partial characterization of starch and protein. *Journal of the Science and Food Agriculture*. 84(10): 1193-1201.
- Bonilla A. y Morúa, G. 2001. Extracción y caracterización parcial del almidón de banano verde utilizando una pectinasa. *Reviteca*. 8.
- Bortnowska G. 2011. Effect of composition, stability and microstructure of o/w emulsions on the retention and release characteristics of diacetyl and (-) alpha-pinene. *Polish Journal of Food by Nutrition Sciences*. 61(2): 125-135.
- Bósquez M. y Vernon C. 2005. Efecto de plastificantes y calcio en la permeabilidad al vapor de agua de películas a base de goma de mezquite y cera de candelilla. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 4(2):157-162.
- Bratskaya S, Schwarz S, Petzold G, Liebert T. y Heinze T. 2006. Cationic starch of high degree of functionalization. Modification of cellulose fibers toward high filler technology in papermaking. *Industrial and Engineering Chemistry*. 45: 7374-7379.
- Busso C, Schebor C, Zamora M, y Chirife J. 2007. Glass transition temperatures and some physical and sensory changes in stored spray-dried encapsulated flavors. *Lebensmittel Wissenschaft y Technology*. 40: 1792–1797.

- Cabrera M, Madrigal A. y Vázquez G. 1999. Extracción y caracterización química de almidón de plátano y banano de las variedades FHIA-01, 20, 21 y 23. IX Congreso de Ciencia de los Alimentos y V Foro de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Colima, Coquimatlán, Col. México.
- Calero J, Sánchez Y, Torrez R, Hernann E y López K. 2008. Elaboración y caracterización de microcápsulas gastrorresistentes de diclofenaco obtenidas por gelificación iónica. Universitas (León). Revista Científica de la UNAN-León. 2(1): 27-30.
- Caló E, Vitaliy V y Khutoryanskiy. 2015. Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. *European Polymer Journal*. 65: 252–267.
- Calvo P, Hernández T, Lozano M. y González G. 2010. Microencapsulation of extra-virgin olive oil by spray-drying: Influence of wall material and olive quality. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 112(8): 852–858.
- Capek I. 2004. Degradation of kinetically-stable o/w emulsions. *Advances in Colloid and Interface Sciences*. 107(2-3):125-55.
- Carvalho A, Silva V. y Hubinger M. 2014. Microencapsulation by spray drying of emulsified green coffee oil with two-layered membranes. *Food Research International*. 61: 236-245.
- Changhui S, Gunasekaran S. 2010. Rheology and oxidative stability of whey protein isolate-stabilized menhaden oil-in-water emulsions as a function of heat treatment. *Journal of Food Sciences*. 75(1): C1-C8.
- Chapman, S. 2011. Guidelines on approaches to the replacement of tartrazine, allura red, ponceau 4R, quinoline yellow, sunset yellow and carmoisine in food and beverages. Food Standards Agency. Campden Technology Limited. 1–38.
- Chen J, Li F, Li Z, Julian D. y Xiao H. 2017. Encapsulation of carotenoids in emulsion based delivery systems: Enhancement of  $\beta$ -carotene water dispersibility and chemical stability. *Food Hydrocolloids*. 69: 49–55.
- Chen L, Chen J, Ren J y Zhao M. 2011. Food Hydrocolloids Modifications of soy protein isolates using combined extrusion pre-treatment and controlled enzymatic

- hydrolysis for improved emulsifying properties. *Food Hydrocolloids*. 25(5): 887–897.
- Chiou D. y Langrish T. 2007. Crystallization of amorphous compoous components in spray-dried powders. *Drying Technology*. 25: 1427-1435.
- Deckardt K, Khiaosa-ard R, Grausgruber H. y Zebeli Q. 2014. Evaluation of various chemical and thermal feed processing methods for their potential to enhance resistant starch content in barley grain. *Starch/stärke*. 66: 558- 565.
- Delgado V y Paredes L. 2003. Pigments as food colorants. In: *Natural colorants for foods and nutraceutical uses*. Boca Raton, FL: CRC Press 1:35-61.
- Desai K y Park H. 2005. Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Drying Technology*. 23(7): 1361-1394.
- Doki L. 2012. Food Hydrocolloids Physicochemical characteristics and stability of oil-in-water emulsions stabilized by OSA Starch. 29: 185–192.
- Dudhani A. y Kosaraju S. 2010. Bioadhesive chitosan nanoparticles: Preparation and characterization. *Carbohydrate Polymers*. 81(2): 243–251.
- Eng C, Zhi Y, Soon P, Rachel F. y Pogaku R. 2010. Encapsulation of herbal aqueous extract through absorption with ca-alginate hydrogel beads. *Food y Bioproducts Processing*. 88(2-3): 195-201.
- Englyst H. y Cummings J. 1986. Digestion of the carbohydrates of banana (*Musa paradisiaca sapientum*) in the human small intestine. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 44: 42-50.
- Espinoza S, Jane J, Bello P. 2009. Physicochemical characteristics of starches from unripe fruits of mango and banana. *Starch/stärke*. 61: 291-299.
- Estevinho B, Rocha F, Santos L. y Alves A. 2013. Microencapsulation with chitosan by spray drying for industry applications - A review. *Trends in Food Science and Technology*. 31(2): 138–155.
- Fazilah A, Maizura M, Abd-Karim A, Bhupinder K. y Rajeev B. 2011. Physical and mechanical properties of sago starch-alginate films incorporated with calcium chloride. *International Food Research Journal*. 18(3): 1027-1033.
- Fraser P. y Bramley P. 2004. The biosynthesis and nutritional uses of carotenoids. *Progress in Lipid Research*. 43:228-265.



- Fuchs M, Turchiuli M, Cuvelier C, Ordonnaud M, Peyrat A. y Dumoulin E. 2006. Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*. 75(1): 27-35.
- Gallardo G, Guida L, Martínez V, López M, Bernhardt D, Blasco R. y Pedroza I. 2013. Microencapsulation of linseed oil by spray drying for functional food application. *Food Research International*. 52(2): 473–482.
- Gharsallaoui A, Roudaut G, Chambin O, Voilley A y Saurel R. 2007. Applications of spray drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*. 40: 1107-1121.
- Gibbs B, Kermasha S, Alli I. y Mulligan C. 1999. Encapsulation in the food industry: a review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. 50(3): 213–224.
- Giuffrida D, Salvo F, Salvo A, Cossignani L, y Dugo G. 2011. Pigments profile in monovarietal virgin olive oils from various Italian olive varieties. *Food Chemistry*. 124: 1119-1123.
- Guan J. y Hanna A. 2004. Extruding foams from corn starch acetate and native corn starch. *Biomacromolecules*. 5: 2329-2339. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/bm049512m>
- Guevara C, Héctor A, Mejía A. y Peláez A. 2012. Obtención de etanol y biogás a partir de banano de rechazo. *Información Tecnológica*. 23(2): 19-30.
- Hong K, Chin P, Jamilah B, Siou P. 2012. Effects of Different Wall Materials on the Physicochemical Properties and Oxidative Stability of Spray-Dried Microencapsulated Red-Fleshed Pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) Seed Oil. *Food Bioprocess and Technology*. 5 (4): 1220-1227.
- Hu X, Xie Y, Jin Z, Xu X y Chen H. 2014. Effect of single, dual, and triple-retrogradation treatments on *in vitro* digestibility and structural characteristics of waxy wheat starch. *Food Chemistry*. 157: 373- 379.
- Hur S, Decker E, y McClements. 2009. Influence of initial emulsifier type on microstructural changes occurring in emulsified lipids during *in vitro* digestion. *Food Chemistry*. 114(1): 253–262.
- Janiszewska T. y Witrowa R. 2009. The influence of powder morphology on the effect of rosemary aroma microencapsulation during spray drying. 44(12): 2438-2444.

- Janiszewska T. 2017. Carotenoids microencapsulation by spray drying method and supercritical fluid micronization. *Food Research International*. 99(2): 891-901.
- Kador K. y Subramanian A. 2011. Selective modification of chitosan to enable the formation of chitosan-dna condensates by electron donator stabilization. *International Journal of Carbohydrate Chemistry*. 1: 1-11.
- Kandansamy K. y Somasundaram P. 2012. Microencapsulation of Colors by Spray Drying-A Review. *International Journal of Food Engineering*. 8(2): 1-18.
- Kaushik P, Dowling K, Barrow C. y Adhikari B. (2015). Microencapsulation of omega-3 fatty acids: A review of microencapsulation and characterization methods. *Journal of Functional Foods*. 19, 868-881.
- Kaushik V. y Roos Y. 2007. Limonene encapsulation in freeze-drying of gum arabic–sucrose–gelatin systems. *Lebensmittel Wissenschaft and Technology*. 40: 1381-1391.
- Kawaljit S. and Narpinder S. (2007). Some Properties of Corn Starches II: physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties. *Food Chemistry*. 101 (4): 1499–1507.
- Kerch G, Sabovics M, Kruma Z, Kampuse S. y Straumite E. 2011. Effect of chitosan and chitooligosaccharide on vitamin C and polyphenols contents in cherries and strawberries during refrigerated storage. *European Food Research y Technology*. 233(2): 351-358.
- Kha T, Nguyen M. y Roach P. 2010. Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder. *Journal of Food Engineering*. 98: 385-392.
- Kha T, Nguyen M, Roach, P. y Stathopoulos C. 2014. Microencapsulation of Gac oil: Optimization of spray drying conditions using response surface methodology. *Powder Technology*. 264, 298-309.
- Kim B, Kim H, Hong J, Huber K, Shim J. y Yoo S. 2013. Effects of amylosucrase treatment on molecular structure and digestion resistance of pre-gelatinised rice and barley starches. *Food Chemistry*. 138, 966- 975.

- Kim H. y White P. 2012. *In vitro* digestion rate and estimated glycemic index of oat flours from typical and high  $\beta$ -glucan oat lines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 60: 5237-5242.
- Kläui H. y Bauernfeind J. 1981. Carotenoids as food colors. Carotenoids as colorants and vitamin A precursors. Academic Press, Inc.
- Krstonošić V, Dokić L, Nikolić I, Milanović M. 2015. Influence of xanthan gum on oil-in-water emulsion characteristics stabilized by OSA starch. *Food Hydrocolloids*. 45: 9-17. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0268005X14003968>.
- Landerito N. y Wang Y. 2005. Preparation and properties of starch phosphates using waxy, common, and high-amylose corn starches II. Reactive extrusion method. *Cereal Chemical*. 82 (3): 271-276.
- Latha B, Jeevaratnam K. 2010. Purification and Characterization of the pigments from *Rhodotorula glutinis* DFR-PYD isolated from natural source. *Global Journal of Biotechnology and Biochemistry*. 5(3):166-174.
- Lee K, Lee S. and Lee H. 2013. Influence of storage temperature and autoclaving cycles on slowly digestible and resistant starch (RS) formation from partially debranched rice starch. *Starch/stärke*. 65: 694-701.
- Lii, C.Y. Chang, S.M. y Young, Y.L. 1982. Investigation of the physical and chemical properties of banana starches. *Journal of Food Science*. 47: 1493-1497.
- Liu Z, Li Y, Cui F, Ping L, Song J, Ravee Y, Jin L, Xue Y, Xu J, Li G, Wang Y. y Zheng Y. 2008. Production of octenyl succinic anhydride-modified waxy corn starch and its characterization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 56: 11499-11506.
- López F. 2009. Uso del mézquite como fuente de polisacárido de alto valor agregado. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. Conafor, Pp. 32.
- López O, Zaritzky N, y García M. 2010. Physicochemical characterization of chemically modified corn starches related to rheological behavior, retrogradation and film forming capacity. *Journal of Food Engineering*. 100(1): 160-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.041>.

- Lorenzo G, Cortés N, Zaritzky N. y Califano A. 2017. Reología y microestructura de emulsiones aceite en agua (O/W) estabilizadas con mezclas de hidrocoloides. Jornadas ITE. Facultad de Ingeniería. UNLP. 621-626. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/60406>
- Magaletta R, DiCataldo S, Liu D, Li H, Borwankar R. y Martini M. 2010. *In vitro* method for predicting glycemic index of foods using simulated digestion and an artificial neural network. *Cereal Chemistry*. 87: 363-369.
- Mahae N, Chalal C. y Muhamud P. 2011. Antioxidant and antimicrobial properties of chitosan-sugar complex. *International Food Research Journal*. 18(4): 1543-1551.
- Marefati A, Sjöo M, Timgren A, Dejmeck P. y Rayner M. 2015. Fabrication of encapsulated oil powders from starch granule stabilized W/O/W pickering emulsions by freeze-drying. *Food Hydrocolloids*. 51: 261–271.
- Martínez O, Lapo B, Pérez J, Zambrano C. y Maza F. 2015. Mecanismo de gelatinización del almidón nativo de banano exportable del Ecuador. *Revista Colombiana de Química*. 44 (2): 16-21.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v44n2.55215>
- Martínez O, Lapo C, Pérez R, Zambrano C. y Maza V. 2015. Mecanismo de gelatinización del almidón nativo de banano exportable del Ecuador. *Revista Colombiana de Química*. 44(2): 16-21.
- McClements D, Decker E. y Weiss J. 2007. Emulsion-Based Delivery Systems for Lipophilic Bioactive Components. *Journal of Food Science* 72(8): R119-R124.
- Michalowska A. y Stachowiak B. 2010. The antioxidant potential of carotenoid extract from *Phaffia rhodozyma*. *ACTA Scientiarum Polonorum Technology Aliment*. 9(2): 171-188.
- Montes E, De P. y Ortega F. 2007. Determinación de las condiciones óptimas de encapsulamiento por co-cristalización de jugo de maracuya (*Passiflora edulis*). *Revista Temas Agrarios*. 12: 5-12.
- Morais D, Rotta E, Sargi S, Schmidt E, Bonafe E, Eberlin M. y Visentainer J. 2015. Antioxidant activity, phenolics and UPLC-ESI(-)-MS of extracts from different

- tropical fruits parts and processed peels. *Food Research International*. 77: 392-399.
- Moreno A. y Dufour D. 2016. Propiedades de los almidones aislados del plátano Dominicano Hartón (*Musa* AAB S.) durante el almacenamiento poscosecha. *Agronomía Colombiana*. 34(1): S1343-S1345.
- Murúa P, Beristain G. y Martínez B. 2009. Preparation of starch derivatives using reactive extrusion and evaluation of modified starches as shell materials for encapsulation of flavoring agents by spray drying. *Journal of Food Engineering*. 91: 380-386.
- Nesterenko A, Alric I, Silvestre F. y Durrieu V. 2013. Vegetable proteins in microencapsulation: A review of recent interventions and their effectiveness. *Industrial Crops and Products*. 42: 469–479.
- Nik A, Corredig M, Wright A. 2010. Changes in wpi-stabilized emulsion interfacial properties in relation to lipolysis and  $\beta$ -carotene transfer during exposure to simulated gastric duodenal fluids of variable composition. *Food Digestion*. 1:14-27.
- Nuñez S, García S, Gutiérrez M, Sánchez R. y Bello P. 2011. Some intrinsic and extrinsic factors of acetylated starches: Morphological, physicochemical and structural characteristics. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 10: 501-512.
- Pacheco A. y Giusepina T. 2005. Evaluación Nutricional, Física y Sensorial de Panes de Trigo y Plátano Verde. *Interciencia*. 30(5): 300-304.
- Parada J, Aguilera J. y Brennan C. 2011. Effect of guar gum content on some physical and nutritional properties of extruded products. *Journal of Food Engineering*. 103(3): 324-332.
- Parra H. 2010. Food Microencapsulation: A Review. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 63(2):5669-5684.
- Pérez S. 2007. Efecto del consumo de una formulación que incluye almidón resistente en la glucemia postprandial de pacientes con *diabetes mellitus* tipo 2. Tesis de Maestra en Ciencias Alimentarias. División Académica de Ciencias Agropecuarias. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Pp. 90.

- Porrarud S. y Pranee A. 2010. Microencapsulation of Zn-chlorophyll pigment from Pandan leaf by spray drying and its characteristics. *International Food Research Journal*. 17(4): 1031-1042.
- Pulido A. y Beristain C. 2010. Encapsulación de ácido ascórbico mediante secado por aspersión, utilizando quitosano como material de pared. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 9(2): 189-195.
- Quevedo N, González R, Abu-Hardan M, García F. y Bello P. 2007. Caracterización de mezclas de almidones de mango y plátano pregelatinizados mediante diferentes condiciones de extrusión. *Revista Agrociencia*. 41: 637-645.
- Ré M. 1998. Microencapsulation by Spray Drying. *Drying Technology* 16(6): 1195-1236.
- Reiner S, Reineccius G. y Peppard T. 2010. A comparison of the stability of beverage cloud emulsions formulated with different gum Acacia and starch based emulsifiers. *Journal of Food Sciences*. 75: 236-246.
- Renard D, Lavenant G, Marie C, Sanchez C. 2006. Acacia Senegal gum: continuum of molecular species differing by their protein to sugar ratio, molecular weight, and changes. *Biomacromolecules*. 7:2637-2649.
- Rendón V, García H, Güizado R, Salgado D. y Rangel V. 2010. Obtención y caracterización de almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.) acetilado a diferentes grados de sustitución. *Afinidad*. 67 (547): 294-300.
- Rodríguez A. y Kimura M. 2004. Harvest Plus Handbook for Carotenoid Analysis. HarvestPlus Technical Monograph 2. Washington, D.C. International Food Policy Research Institute (IFPRI) and International Center for Tropical Agriculture (CIAT). 85-90.
- Romero B, Zamudio F. y Bello P. 2011. Antimicrobianos en películas de almidón oxidado de plátano: Efecto sobre la actividad antibacteriana, microestructura, propiedades mecánicas y de barrera. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 10: 445-453.
- Sáenz C, Tapia S, Chávez J. y Robert P. 2009. Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chemistry*. 114: 616-622.
- SAGARPA. 2006. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. <http://www.sagarpa.gob.mx>.

- Sánchez G, Arab T, Cháfer M, González M. y Chiralt A. 2015. Active edible and biodegradable starch films. *Polysaccharides: Bioactivity and Biotechnology*. 717-734.
- Sánchez R, García S, Velázquez V, Gutiérrez M. y Bello P. 2005. Partial characterization of banana starches oxidized by different levels of sodium hypochlorite. *Carbohydrate Polymers*. 62: 50-66.
- Sarkar S. y Singhal R. 2011. Esterification of guar gum hydrolysate and gum Arabic with n-octenyl succinic anhydride and oleic acid and its evaluation as wall material in microencapsulation. *Carbohydrate Polymers*. 86(4): 1723–1731.
- Sarker M, Elgadir M, Ferdosh S, Akanda M, Aditiawati P. y Noda T. 2013. Rheological behavior of starch-based biopolymer mixtures in selected processed foods. *Starch/stärke*. 65(1-2): 73-81.
- Sasaki T, Kohyama K, Suzuki Y, Okamoto K, Noel T. y Ring S. 2009. Physicochemical characteristics of waxy rice starch influencing the in vitro digestibility of a starch gel. *Food Chemistry*. 116: 137-142.
- Shen Y, Zhang X, Prinyawiwatkul W. y Xu Z. 2014. Simultaneous determination of red and yellow artificial food colourants and carotenoid pigments in food products. *Food Chemistry*. 157: 553–558.
- Shogren R. y Biresaw G. 2007. Surface properties of water soluble maltodextrin, starch acetates and starch acetates/alkenylsuccinates. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 298: 170-176.
- Shu B, Yu W, Zhao Y. y Liu X. 2006. Study on microencapsulation of lycopene by spraydrying. *Journal of Food Engineering*. 76: 664-669.
- Sikora E, Cieslik E. y Topolska K. 2008. The sources of natural antioxidants. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*. 7(1): 5-17.
- Singh J, Dartois A. y Kaur L. 2010. Starch digestibility in food matrix: a review. *Trends in Food Science and Technology*. 21: 168-180.
- Steffolani M, Bustos M, Ferreyra M. y León A. 2017. Evaluación de la calidad tecnológica, nutricional y sensorial de barras de cereal con quinoa. *AGRISCIENTIA*. 34 (II): 33-43.

- Sun W, Wadhwa S. y Waterhouse G. 2012. Spray-Drying Microencapsulation of Polyphenol Bioactives: A Comparative Study Using Different Natural Fibre Polymers as Encapsulants. *Food Bioprocess and Technology*. 6 (9). 2376-2388.
- Sutter S, Buera M. y Elizalde B. 2007.  $\beta$ -Carotene encapsulation in a mannitol matrix as affected by divalent cations and phosphate anion. *International Journal of Pharmaceutics*. 332: 45–54.
- Sweedman M, Tizzotti M, Schäfer C. y Girbert R. 2013. Structure and physicochemical properties of octenyl succinic anhydride modified starches: A review. *Carbohydrate Polymers*. 92: 905-920.
- Tesch S, Gerhards Ch y Schubert H. 2002. Stabilización of emulsion by OSA starches. *Journal of Food Engineering*. 54 (2): 167-174.
- Tester R. y Morrison W. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches. *Cereal Chem*. 67: 558–563.
- Tortoe C, Johnson P, Slaghek T, Miedema M. y Timmermans T. 2013. Physicochemical, proximate and sensory properties of mango. *Food and Nutrition Sciences*. 4: 163-168.
- Trommer, H. y Neubert, R. 2005. The examination of polysaccharides as potential antioxidative compounds for topical administration using a lipid model system. *International Journal of Pharmaceutics*. 298 (1):153-163. ISSN: 0378-5173.
- Varona S, Martin A. y Cocero M. 2009. Formulation of natural biocide based on lavandin essential oil by emulsification using modified starches. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 48: 1121-1128.
- Vernon C, Gomez S, Beristain C, Mosqueira G, Pedroza I. y Moreno T. 1996. Color degradation and coalescence kinetics of Aztec marigold oleoresin-in-water emulsions stabilized by mesquite or arabic gums and their blends. *Journal Texture Studies*. 27: 625-641.
- Wang B, Dong L, Li J, Wang J. y Özkan N. 2010. Effect of concentrated flaxseed protein on the stability and rheological properties of soybean oil-in-water emulsions. *Journal of Food Engineering*. 96(4): 555–561.
- Wang L. y White P. 1994. Structure and physicochemical properties of starches from oats with different lipid content. *Cereal Chemistry*. 71(5): 443-450.



- Xie F, Yu L, Liu H. y Chen L. 2006. Starch modification using reactive extrusion. *Starch/stärke*. 58: 131-139.
- Xu D, Yuan F, Gao Y, Panya A, McClements D. y Decker E. 2014. Influence of whey protein-beet pectin conjugate on the properties and digestibility of  $\beta$ -carotene emulsion during *in vitro* digestion. *Food Chemistry*. 156: 374–379.
- Yáñez F, Ramos R. y Salazar M. 2007. Rheological characterization of dispersions and emulsions used in the preparation of microcapsules obtained by interfacial polymerization containing *Lactobacillus* sp. *The Journal European Food Research and Technology*. 226: 957-966.
- Yañez J, Salazar L, Chaires J. Jiménez M, Márquez y Ramos E. 2002. Aplicaciones biotecnológicas de la microencapsulación. *Revista Avance y Perspectiva*. 21: 313-319.
- Zambrano F, y Camargo C. 2001. Optimization of the conditions for the acid hydrolysis of cassava starch to obtain a fat replacer. *Brazilian Journal of Food Technology*. 4: 147-154.
- Zhang B, Wang K, Hasjim J, Li E, Flanagan B, Gidley M. y Dhital S. 2014. Freeze-drying changes the structure and digestibility of  $\beta$ -Polymorphic starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 62: 1482-1491.
- Zhu J, Li L, Chen L. y Li X. 2013 Nano-structure of octenyl succinic anhydride modified starch micelle. *Food Hydrocolloids*. 32: 1-8.
- Zhu W, Xie H, Song X. y Ren H. 2011. Production and physicochemical properties of 2-Octen-1-Ylsuccinic derivates from waxy corn starch. *Journal of Food Science*. 76(3): 1176-1182.
- Zuidam N. y Shimoni E. 2010. Overview of microencapsulates for use in food products or processes and methods to make them. *Encapsulation Technologies for Food Active Ingredients and Food Processing*. Dordrecht, The Netherlands. p. 3-30.
- Zuidam N. y Nedovic, V. 2010. *Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing*. Springer. London. [http://DOI 10.1007/978-1-4419-1008-0](http://DOI.10.1007/978-1-4419-1008-0).

## 10. RESUMEN BIOGRÁFICO

### Verónica de la Cruz de la Cruz

Candidato al grado de Doctor en Ciencias con Acentuación en Alimentos

**Tesis:** Efecto de las matrices biopoliméricas en la cinética de liberación *in vitro* de antioxidantes microencapsulados con membranas líquidas y sólidas

**Campo de estudio:** Ciencia de los Alimentos.

**Datos personales:** Nacida en Villahermosa Tabasco. El 09 de Noviembre de 1979, hija del Sr. Juan de la Cruz Ólan y la Sra. Norma de la Cruz Morales.

#### **Educación:**

- Egresada de la División Académica de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco con la Licenciatura de Ingeniería en Agroalimentos (1997-2002).
- Egresada de la División Académica de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco con el Grado de Maestro en Ciencias Alimentarias (2006-2009).

## **Experiencia profesional:**

- Chef Instructora del Instituto Mexicano de Gastronomía con más de 20 alumnos en clases teóricas y prácticas presenciales, con cuatro grupos con horarios de 8 a 11 am, 11 a 14, de 14 a 17 h y de 17 a 20 h. El área es Bases de Cocina. Duración desde Septiembre del 2017 hasta hoy en día, mes de Mayo 2018.
- Profesora de 36 de 40 horas frente a grupo, impartiendo las clases en el área de ciencias, de las materias de Física a 4 grupos de segundo grado de 40 a 45 estudiantes cada grupo. La materia de Química a dos grupos de tercer grado, de 38 a 43 alumnos por grupo, así como también la materia de Inglés básico a 6 grupos de alumnos de primer grado con 40 a 45 alumnos cada grupo. Duración de Febrero del 2016 a julio del 2017.
- Haber laborado como Asistente de Investigación en el Laboratorio de Biotecnología de Alimentos, bajo la dirección de la Dra. Lilí Rodríguez Blanco, Profesor Investigador de la DACA-UJAT.
- Haber laborado en los talleres de procesamiento de productos alimentarios de la División Académica de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Haber laborado como consultor a Empresas Regionales en el área de Alimentos en colaboración con el Químico Josafat Alberto Hernández Becerra, Profesor Investigador de la UTAB.
- Primer Lugar del Premio Institucional a la Mejor Tesis 2011, a nivel Maestría en el área de Biotecnología y Ciencias Agropecuarias.
- Nombramiento como Miembro del Sistema Estatal de Investigadores durante el periodo comprendido de Diciembre de 2011 a Diciembre de 2012, otorgado por el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Tabasco.
- Realización de una estancia de investigación en el CINVESTAV Unidad Querétaro, con el Dr. Gerónimo Arámbula Villa, para la realización de una parte experimental de la tesis de Doctorado. Diciembre 2014.
- Realización de una estancia en la Facultad de Ciencias Biológicas, en la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) con la Dra. Martha Guerrero

Olazarán, en el Instituto de Biotecnología de la facultad de Ciencias Biológicas de la UANL.

- Realización de una estancia en la Facultad de Química, en la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) con el M. C. Gustavo Pedraza Aboytes, Facultad de Química de la UAQ.
- Realización de una estancia en la Facultad de Química en el Departamento de Alimentos y Biotecnología en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) con la Dra. María del Carmen Wachter Rodarte, Profesora-Investigadora del Departamento de Investigación y Posgrado de Alimentos de la Facultad de Química de la UNAM.