

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS QUÍMICO-BIOLÓGICAS

UTILIZACIÓN DE LA GOMA DE MEZQUITE (*Prosopis spp*)
COMO SUSTITUTO DE LA GOMA ARÁBIGA (*Acacia spp*) EN
FORMULACIONES DE HELADOS LÁCTEOS

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de

QUÍMICO EN ALIMENTOS

Presenta:

Adrian Gilberto Encinas Cárdenas

Hermosillo, Sonora

Agosto de 2016

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

FORMA DE APROBACION

Hermosillo, Sonora, 19 de Agosto del 2016

Los miembros del jurado designado para revisar la Tesis Profesional de **Adrian Gilberto Encinas Cárdenas** la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el Título de **Lic. Químico en Alimentos**.

Dra. Ofelia Rouzaud Sáñez
Director

Mtra. Rosalina Ramirez Olivas
Secretario

Dra. Abril Zoraida Graciano Verdugo
Vocal

Dra. María Engracia Arce Corrales
Suplente

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Primeramente quiero agradecer a mi familia: padres, hermanos, tíos, tías, etc., a mi novia, a mis amigos, y allegados por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de mi carrera, ya que sin ellos no hubiera podido estar en donde me encuentro ahora mismo y que gracias a eso he podido salir adelante.

Quiero agradecer también, a mis maestros que tuve durante los años que pasé en la escuela, por todo lo que me han enseñado y la ayuda que me han dado para así lograr mis objetivos, así como, a mis maestros sinodales que son los últimos dadores de conocimiento y sabiduría que me han tocado para ponerle fin a este capítulo de mi vida, llamado Universidad.

Y por último, pero no por eso menos importante, agradecer a mi directora de tesis, la Dra. Ofelia Rouzaud Sáñez, por todo el apoyo y la paciencia que me ha brindado a lo largo de esta tesis, por el tiempo que le ha dedicado a ayudarme a terminar este proyecto, ya que sin ella no hubiera podido salir adelante.

“El dolor es temporal, puede durar un minuto, una hora, un día, o incluso un año.

Pero finalmente desaparecerá, y otra cosa lo reemplazará.

Sin embargo, si abandono, durará para siempre”

Eric Thomas

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE FIGURAS	7
RESUMEN.....	9
INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVOS	14
Objetivo General	14
Objetivos Específicos	14
ANTECEDENTES.....	15
Postres Congelados	15
Producción Mundial.....	17
Componentes y Aditivos Utilizados en la Preparación de Helados Lácteos.....	18
Grasa.....	18
Sólidos de Leche no Grasos.....	20
Edulcorantes.....	21
Saborizantes.....	21
Agua	22
Estabilizadores	22
Hidrocoloides.....	22
Emulsionantes	24
Función de los Componentes en una Formulación de Helados Lácteos	25
Elaboración de Helados Lácteos	27
Mezclado.....	27
Homogeneizado.....	28
Pasteurizado.....	29
Maduración.....	30
Congelación	31
Aspectos Generales del Árbol del Mezquite (Prosopis spp).....	32
Características Fisicoquímicas y Estructurales de la Goma de Mezquite (Prosopis spp)	33
Propiedades Funcionales de la Goma de Mezquite (Prosopis spp).....	34

Características Fisicoquímicas y Estructurales de la Goma Arábica (<i>Acacia spp</i>)	34
Propiedades Funcionales de la Goma Arábica (<i>Acacia spp</i>).....	35
MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
Obtención de la Materia Prima	37
Clarificación de la Goma de Mezquite (<i>Prosopis spp</i>)	37
Composición Química.....	38
Contenido de Proteína	38
Contenido de Cenizas	39
Contenido de Taninos.....	39
Contenido de Agua y Polisacáridos.....	39
Determinación de las Características Fisicoquímicas del Sistema Agua-Goma	39
Viscosidad Dinámica	39
Tensión Superficial.....	40
Determinación del Efecto de la Adición de Goma de Mezquite (<i>Prosopis spp</i>) y de Goma Arábica (<i>Acacia spp</i>) en las Propiedades de la Congelación y la Descongelación de una Solución Agua-Goma.....	41
Determinación del Efecto de la Adición de Goma de Mezquite (<i>Prosopis spp</i>) y de Goma Arábica (<i>Acacia spp</i>) a una Formulación Láctea para Helado, en las Propiedades de la Congelación y la Descongelación	42
Determinación de la Adición de la Goma de Mezquite (<i>Prosopis spp</i>) y de la Goma Arábica (<i>Acacia spp</i>) en la Cantidad de Hielo que se Formó en la Congelación de la Solución Agua/Goma y en la Mezcla Agua/Formulación Láctea/Goma	43
Diseño de Experimentos y Análisis Estadístico	44
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
Contenido de Proteína, Taninos y Cenizas de la Goma de Mezquite (<i>Prosopis spp</i>) y de la Goma Arábica (<i>Acacia spp</i>)	46
Tensión Superficial de las Soluciones de Agua/Goma de Mezquite (<i>Prosopis spp</i>) y de Goma Arábica (<i>Acacia spp</i>)	49
Propiedades para Emulsionar la Grasa Butírica por la Solución Agua/Goma de Mezquite (<i>Prosopis spp</i>) y Goma Arábica (<i>Acacia spp</i>).....	50
Características Viscosimétricas de la Solución Agua/Goma	53

Determinación del Efecto de la Adición de la Goma de Mezquite (<i>Prosopis spp</i>) y Goma Arábica (<i>Acacia spp</i>) en las Propiedades de la Congelación y la Descongelación de la Solución Agua/Goma.....	56
Establecimiento de la Curva de Congelación de las Soluciones de Goma de Mezquite (<i>Prosopis spp</i>) y Goma Arábica (<i>Acacia spp</i>).....	56
Características del Congelamiento.....	57
Establecimiento de la Curva de Descongelación de la Solución Agua/Goma	59
Características de la Descongelación.....	60
Determinación del Efecto de la Adición de Goma de Mezquite (<i>Prosopis spp</i>) y de Goma Arábica (<i>Acacia spp</i>), en las Propiedades de la Congelación y la Descongelación de la Mezcla Agua/Formula Láctea/Goma	61
Establecimiento de la Curva de Congelación de la Mezcla Agua/Formula Láctea/Goma de Mezquite (<i>Prosopis spp</i>) y Goma Arábica (<i>Acacia spp</i>).....	61
Características del Congelamiento.....	63
Establecimiento de la Curva de Descongelación de la Mezcla Agua/Fórmula Láctea/Goma de Mezquite (<i>Prosopis spp</i>) y Goma Arábica (<i>Acacia spp</i>).....	66
Características del Descongelamiento.....	68
CONCLUSIONES.....	73
RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	75

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1.	Composición general de una mezcla de helado lácteo.	15
2.	Valores promedio para grasa y contenidos de sólidos totales, agregado de aire y costo entre las categorías de helados lácteos.	16
3.	Producción global de helado lácteo por año, región y país, '000 Lts.	17
4.	Funciones y limitaciones de los componentes base de un helado lácteo.	25
5.	Características químicas de la GM.	34
6.	Proporciones de sólidos totales y de GM y de GA (% p/V) en las mezclas para caracterizar su congelación y descongelación.	44
7.	Valores promedio y desviación estándar (n = 3) del contenido (%) de la GM y de la GA.	47
8.	Datos termogravimétricos obtenidos de la GM y de la GA en el TGA durante el calentamiento a 10°C/min, bajo atmósfera de nitrógeno desde 20°C a 600°C.	50
9.	Tiempo de congelación de las soluciones de GM y de GA en sus diferentes etapas.	58
10.	Tiempo de descongelación de las soluciones de GM y de GA en sus diferentes etapas.	62
11.	Tiempo de la congelación de las mezclas agua/fórmula láctea/GM y de GA en sus diferentes etapas.	65
12.	Tiempo de la descongelación de las mezclas agua/fórmula láctea/GM y de GA en sus diferentes etapas.	70
13.	Cantidad de agua ligada, agua congelable, hielo y agua sin congelar de la solución agua/goma y de la mezcla agua/goma/fórmula láctea de la GM y de la GA, calculada con el procedimiento para un alimento a temperaturas de sub-enfriamiento.	71

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.	Distribución de las tierras secas de México.	12
2.	Área de muestreo de la GM.	38
3.	Diagrama de flujo de la clarificación de la GM.	39
4.	Esquema del sistema para obtener las características de congelación y descongelación.	43
5.	Curvas de TGA (a) y sus derivadas (b) de la GM y de la GA. Etapa 1: Desorción del agua, Etapa 2: Primera degradación de las gomas, Etapa 3: Segunda degradación de las gomas.	49
6.	Tensión superficial de la GM y de la GA a distintas concentraciones.	51
7.	Actividad emulsionante de la solución agua/GM y de la GA con grasa butírica fundida a $37^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$.	52
8.	IEE con grasa butírica, como una función del tipo y la concentración de GM y de GA.	53
9.	Viscosidad de las soluciones de GM y de GA como una función del aumento de la velocidad de corte, medida a concentraciones de 0.2 y 0.4% (p/V).	55
10.	Curvas del log de la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) versus el log del esfuerzo de corte (τ) de la solución agua/GM (a) y agua/GA (b).	56
11.	Curvas de congelación de las soluciones de GM y de GA a concentraciones de 0.2% y 0.4%.	58
12.	Curvas de descongelación de las soluciones de GM y de GA a concentraciones de 0.2% y 0.4%.	61
13.	Curvas de congelación de las mezclas agua/fórmula láctea/GM y de GA, con concentraciones de 33% de fórmula láctea.	64
14.	Curvas de congelación de las mezclas agua/fórmula láctea/GM y de GA, con concentraciones de 39% de fórmula láctea.	64
15.	Efecto de la concentración y tipo de goma (GM y GA) en la temperatura de Sub-E de la solución agua/goma y de la mezcla agua/fórmula láctea/goma.	67

16. Curvas de descongelación de las mezclas agua/fórmula láctea/GM y de GA, con concentraciones de 33% de fórmula láctea. 68
17. Curvas de descongelación de las mezclas agua/fórmula láctea/GM y de GA, con concentraciones de 39% de fórmula láctea. 69

RESUMEN

La goma de mezquite es un polisacárido derivado del árbol de mezquite (*Prosopis spp*). Este polisacárido es un arabinogalactano proteico cuyas propiedades químicas, macromoleculares y funcionales son similares a las de la goma arábiga (*Acacia spp*). En este estudio, se evaluaron las propiedades estabilizantes de la goma de mezquite, que se relacionan con la congelación y la descongelación de soluciones acuosas y en formulaciones lácteas para helados. Se determinó la composición química, las propiedades de superficie y reológicas, y las propiedades relacionadas con la congelación y la descongelación. Estas características fisicoquímicas se compararon con las determinadas para la goma arábiga, ya que esta goma es comúnmente utilizada como estabilizante en helados lácteos. En cuanto a la composición de cada una de las gomas, se observó que la goma de mezquite posee 1.1% más de proteínas y 0.08% menos de taninos que la goma arábiga, siendo esto favorable, ya que se sabe que las proteínas tienen gran influencia en las propiedades que se estudiaron, y que cumple con el límite permitido de taninos en helados (<0.04%) a las concentraciones usadas en la formulación. Para ambas gomas estudiadas, se observaron propiedades reológicas y de superficie con una mayor actividad y con un comportamiento parecido al newtoniano ($n=1$), a concentraciones de 0.2%, que es lo que se busca en un estabilizante para helados, siendo mayor para la goma de mezquite ($n=0.97$), que para la goma arábiga ($n=0.93$). Así mismo, se observó que para las propiedades emulsionantes, a mayor concentración de goma, mayor actividad y estabilidad emulsionante, en donde la goma de mezquite presentó mejores valores que la goma arábiga, lo que indica que la goma de mezquite podría coadyuvar de mejor forma a la estructura de la grasa en el helado favoreciendo sus características sensoriales. Por otra parte, para los parámetros de la congelación y la descongelación, se obtuvieron resultados estadísticamente diferentes ($p>0.05$), en cuanto a las concentraciones de goma (0.2% y 0.4%), de fórmula láctea (33% y 39%) y, al tipo de goma, donde para la goma de mezquite los mejores valores se observaron con 0.2% de goma y 39% de fórmula láctea, en cambio para la goma arábiga, con 0.4% de goma y 33% de fórmula láctea. La relación entre las características químicas y las propiedades fisicoquímicas de la goma de mezquite, sugieren que puede ser utilizado como un estabilizante en una formulación láctea para helados, sustituyendo así, a la goma arábiga que debido a su falta de disponibilidad, se ha visto reducida su utilización en este tipo de productos.

INTRODUCCIÓN

En la fabricación de helados, se prepara una mezcla líquida que consiste en grasa emulsionada, micelas de caseína dispersas, proteínas de suero disueltas, polisacáridos, azúcares y sales. Esta mezcla, se airea y conjuntamente se congela bajo cizallamiento en un congelador de superficie raspada para producir fases dispersas de burbujas de aire y cristales de hielo. Al mismo tiempo, la emulsión de grasa se somete a la coalescencia parcial y la solución se concentra por congelación (Goff y Hartel, 2013). Con formulaciones típicas y a temperaturas adecuadas, alrededor del 70% del agua se convierte en hielo, por lo que la fase no congelada de los helados que rodea al hielo, al aire y a la grasa, está conformada por los azúcares, las micelas de caseína, las proteínas del suero de leche y los polisacáridos, y ocupa un poco más del 20% del volumen. Estas soluciones son extremadamente viscosa, y sin embargo contribuyen en gran medida a la textura y la estabilidad del helado (Goff, 2003).

Una de las causas importantes del deterioro de la textura del helado es la recrystalización del hielo, y es una de las principales razones para que los polisacáridos estén en las formulaciones: para estabilizar la estructura reduciendo la tasa de recrystalización (Goff y Hartel, 2013). Los estabilizadores también reciben los nombres de hidrocoloides, coloides y gomas, porque estas sustancias son moléculas grandes (macromoléculas) que son capaces de interactuar con el agua (Hoefler, 2004). Al interactuar con el agua también algunos de estos compuestos, interactúan con las proteínas y los lípidos de la mezcla (Goff y Caldwell, 1991).

Una variedad de materiales se utilizan como estabilizadores, tales como, goma guar, carboximetilcelulosa sódica, celulosa microcristalina, goma de algarrobo, carragenina y goma arábica (Goff y Hartel, 2013). La goma arábica (*Acacia spp.*), que se produce principalmente en regiones de África, tiene problemas de escasez periódica e inseguridad en el suministro y precios (Dickinson, 2003), lo que conllevan a la búsqueda de otras fuentes botánicas de gomas capaces de remplazarla. Tal es el caso de la goma de mezquite (*Prosopis spp.*), de la que se conocen su composición química y algunas propiedades fisicoquímicas que son parecidas a las de la goma arábica (López-Franco et al, 2004, 2008, 2012).

El árbol de mezquite se distribuye en las zonas áridas del mundo (Mirhosseini et al., 2012), y en México ocupa cerca del 50% de la superficie de las zonas áridas y semiáridas del país (Solís, 1995, citado por Meza y Osuna, 2003). En el Estado de Sonora, predominan esas

dos clases de aridez (SEMARNAT, 2014) (Figura 1), y la explotación del árbol que allí crece, es, principalmente, para proveer madera, leña y carbón. La vaina y la semilla se usan para la alimentación animal y en algunos lugares para la alimentación humana; y la goma o chúcaro, que exuda del tronco del árbol, se usa también para la fabricación artesanal de pegamento (López-Franco et al., 2008).

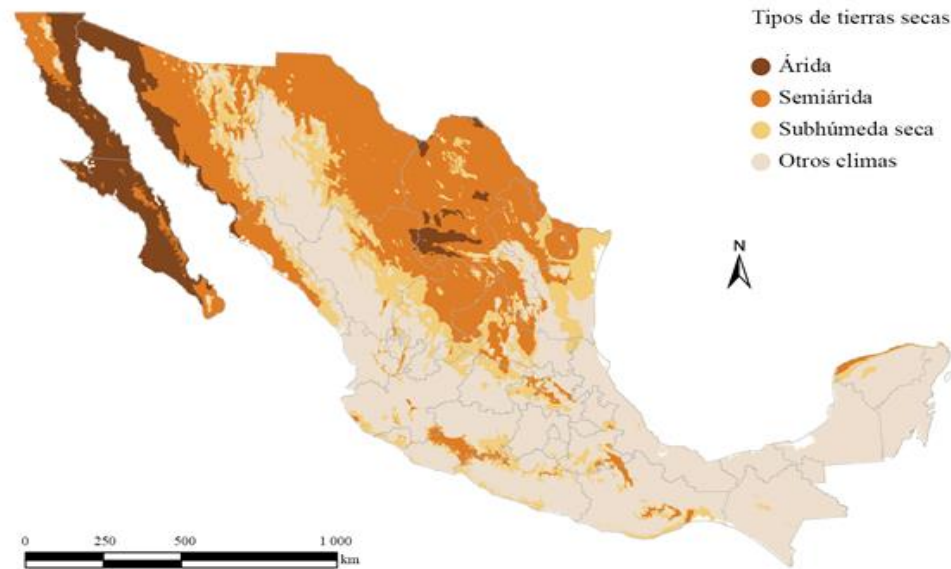


Figura 1. Distribución de las tierras secas de México. Fuente: SEMARNAT, 2014

Para avistar las posibilidades de aplicación de la goma de mezquite, como aditivo estabilizador de helados lácteos, se necesita evaluar el efecto que su incorporación a la mezcla de formulación láctea en agua, causa en las propiedades que se relacionan con la congelación y la descongelación, y compararlas con las que resultan con una goma de uso común, como la goma arábica. La contribución de los estabilizadores en los helados lácteos, se relaciona principalmente con sus efectos reológicos, y su actividad en las interfaces agua/aire y agua/grasa (Garti et al., 1999). Así, al aumentar la viscosidad de la mezcla, retardan o reducen el crecimiento de los cristales de hielo; ayudan a producir una espuma estable, con suficiente rigidez que facilite la cizalla en la etapa de la congelación dinámica; durante la etapa de congelación estática, reducen el crecimiento de los cristales de hielo, por lo que evitan un

endurecimiento excesivo del producto. Entre otros efectos, proporcionan resistencia a la fusión y producen la suavidad en la textura durante el consumo (Goff, 2003).

La goma de mezquite (*Prosopis spp*), al compartir características de composición química y algunas propiedades fisicoquímicas con la goma arábica (*Acacia spp.*), se presume como un buen reemplazo para usarse como estabilizador de helados lácteos. Su disponibilidad en zonas áridas del país y en el Estado de Sonora, tendría beneficios directos a las zonas rurales de estas regiones, toda vez que serían las proveedoras de la materia prima a los industriales.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar las propiedades estabilizantes de la goma de mezquite (*Prosopis spp*) que se relacionan con la congelación y la descongelación de una formulación láctea para helado y compararlas con las de la goma arábica (*Acacia spp*)

Objetivos Específicos

- Determinar el efecto de la adición de goma de mezquite (*Prosopis spp*) en las propiedades de superficie y reológicas de una solución agua-goma y compararlo con la goma arábica (*Acacia spp*)
- Determinar el efecto de la adición de goma de mezquite (*Prosopis spp*) en las propiedades de la congelación y la descongelación de una solución agua-goma y compararlo con la goma arábica (*Acacia spp*)
- Conocer el efecto de la adición de goma de mezquite (*Prosopis spp*) a una formulación láctea para helado, en las propiedades de la congelación y la descongelación y compararlo con la goma arábica (*Acacia spp*)

ANTECEDENTES

Postres Congelados

El producto más común dentro de la categoría de postres congelados es el helado lácteo. Un helado, es un alimento producido mediante la congelación con o sin agitación de una mezcla pasteurizada compuesta por una combinación de ingredientes lácteos pudiendo contener grasas vegetales, frutas, huevo y sus derivados, saborizantes, edulcorantes y otros aditivos alimentarios. Cuando su presentación sea empalillada su denominación será "paleta". Quedan comprendidos los siguientes: Helado de crema, Helado de leche, Sorbete, Helado de crema vegetal, Helado de grasa vegetal y Sorbete de grasa vegetal (NOM-036-SSA1, 1993).

Algunos de los factores que afectan a la elección de la composición del helado lácteo, son los requisitos legales que deben cumplirse, la calidad deseada en el producto final (el aumento de grasa total y sólidos se asocian generalmente con el aumento de la calidad), y el costo que habrá de soportar el consumidor. Los productos Premium por ejemplo generalmente poseen un precio más alto (Goff y Hartel, 2013).

La composición general de la mayoría de productos de helado se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1. Composición general de una mezcla de helado lácteo.

Componente	Rango de concentración
Grasa de leche	>10%-16%
Sólidos lácteos no grasos	9%-12%
Proteínas, lactosa, minerales	
Edulcorantes	
Sacarosa	10%-14%
Sólidos de jarabe de maíz	3%-5%
Estabilizadores	0%-0.25%
Guar, goma de algarrobo, carragenina,	
Carboximetil celulosa, celulosa	
microcristalina, alginato de sodio,	

xantana, gelatina	
Emulsificadores	0%-0.25%
Mono- y di-glicéridos, polisorbato 80	
Agua	55%-64%

Fuente: Goff y Hartel, 2013.

No hay definiciones específicas de los términos aceptados comúnmente por la industria como helados lácteos Premium o Superpremium, sino más bien, existe una relación entre el contenido de grasa, el contenido total de sólidos, contenido de aire, y el costo (también afectada por la calidad y la proporción de inclusiones y cuestiones de marketing), como se ilustra en la Tabla 2:

Tabla 2. Valores promedio de grasa y contenidos de sólidos totales, agregado de aire y costo entre las categorías de helados lácteos.

Componente	Económico	Estándar	Premium	Superpremium
Contenido de grasa	Mínimo legal, usualmente 10%	10-12%	12-15%	15-18%
Sólidos totales	Mínimo legal, usualmente 36%	36-38%	38-40%	>40%
Agregado de aire	Máximo legal	Casi 100%	60-90%	25-50%
Costo	Bajo	Promedio	Más alto que el promedio	Alto

Fuente: Goff y Hartel, 2013.

El helado es considerado por la mayoría de las personas como un producto lácteo, y fabricado con crema fresca o leche fresca como ingrediente, más del 80% de su contenido se deriva de lácteos. Sin embargo, si se fabrica con una grasa no láctea y la leche en polvo reconstituida, en muchos casos, menos del 10% de su contenido se deriva de lácteos, y por lo

tanto con la misma facilidad se puede simplemente ser considerado como un producto alimenticio con un ingrediente lácteo. Por lo tanto, algunos fabricantes, en particular en los Estados Unidos, son empresas lácteas multiproducto, mientras que a nivel mundial, el helado también es fabricado por varias compañías multinacionales de la alimentación, incluyendo Nestlé, Unilever y General Mills, que no necesariamente produce otros productos lácteos (Goff y Hartel, 2013).

Producción Mundial

La producción mundial de helado en el 2010 fue de 16,3 mil millones de litros, frente a los 15,3 mil millones litros en 2006. De la producción mundial en 2010, el 31% perteneció a Asia Pacífico, 29% a América del Norte, 20% a Europa occidental, 7% a Europa del Este, y el 6% en América latina. Por países, Estados Unidos fue el mayor productor alrededor de 4.4 mil millones de litros, seguido por China con 2.9 mil millones de litros, Japón con 0.9 mil millones de litros, Alemania con 0.650 millones de litros, e Italia con 0.6 mil millones de litros, como se puede observar en la Tabla 3:

Tabla 3. Producción global de helado lácteo por año, región y país, '000 Lts.

	2006	2007	2008	2009	2010
Mundo	15,370.0	15,678.8	15,742.7	16,001.1	16,347.5
Norte- América	4,898.2	4,793.8	4,592.7	4,726.9	4,742.9
EUA	4,531.0	4,430.1	4,230.5	4,367.4	4,386.4
Asia	4,317.0	4,536.9	4,724.5	4,722.5	4,901.1
Oeste- Europa	3,226.2	3,284.5	3,300.4	3,384.1	3,436.7
China	2,484.7	2,639.0	2,776.1	2,740.2	2,868.6
Este-Europa	1,131.1	1,158.0	1,147.6	1,111.8	1,128.9
Latino- América	8,74.7	949.9	991.5	1,031.7	1,075.3
México	111.3	115.5	112.6	112.7	113.4

Fuente: modificada de Goff y Hartel, 2013.

La Asociación Internacional de Alimentos Lácteos (IDFA, siglas en inglés) publicó que en el 2013, Estados Unidos produjo 5.79 billones de litros de helados y postres congelados y las ventas subieron un 2.1 % al terminar el mes de agosto de 2014. Las empresas de helados que comercializan productos en todo el mundo identifican a Asia, el Caribe, México y América Latina como importadores (IDFA, 2016).

La industria nacional del helado alcanzó en el 2014, un valor de 850 millones de dólares, pero aún tiene un alto potencial de crecimiento, ya que México reporta uno de los más bajos niveles de consumo per cápita en el contexto internacional, de dos litros al año (El Financiero, 2014). Este bajo consumo en México se debe a factores culturales y de información equivocada de que es un producto nocivo para la salud. En países como Brasil, el consumo de helado es superior en 30 por ciento al de México, en Chile 60 por ciento; incluso el consumo per cápita en Estados Unidos es de 22 litros, en Nueva Zelanda de 26 y Suecia y Noruega entre 18 y 20 litros (El Financiero, 2014).

Componentes y Aditivos Utilizados en la Preparación de Helados Lácteos

Grasa

Es el componente graso de las mezclas de productos lácteos de postres congelados. En la fabricación de helados se pueden usar grasas comestibles más baratas en sustitución de la grasa de origen lácteo como la crema y la manteca. Las grasas comestibles se pueden clasificar en tres grandes grupos (MAGyP, 2005):

- Aceites, que son líquidos a una temperatura de 25°C.
- Grasa vegetales, en estado sólido a una temperatura de 25°C.
- Grasas animales, que son sólidas a una temperatura de 25°C e incluyen los sebos y las mantecas de origen animal.

El componente graso de las mezclas de productos lácteos de postres congelados aumenta la riqueza del sabor, produce una textura suave característica lubricando el paladar,

ayuda a dar cuerpo, y ayuda en la producción de propiedades de fusión deseables (Marshall et al., 2003).

El contenido de grasa de una mezcla también ayuda en la lubricación del recipiente congelador mientras está siendo fabricado el helado lácteo. Las limitaciones en el uso excesivo de grasa en una mezcla incluyen el costo, una obstrucción en la habilidad del batido, disminución del consumo debido a la abundancia excesiva y un alto valor calórico. Durante la congelación del helado lácteo, la emulsión de grasa que existe en la mezcla parcialmente se coalesce (desestabiliza) como resultado de la acción emulsionante, la incorporación de aire, la cristalización del hielo, y a altas fuerzas de cizallamiento de las cuchillas (Goff y Jordan, 1989).

Las grasas vegetales se utilizan ampliamente como fuentes de grasa en los helados en el Reino Unido y en algunas regiones de Europa, pero sólo en una medida muy limitada en América del Norte. En la selección de la fuente de grasa, se toman en cuenta tres factores, que son: la forma en la que la grasa se cristaliza, el perfil de fusión dependiente de la temperatura de la grasa, especialmente a temperaturas del refrigerador y congelador, y el sabor y la pureza del aceite (Berger, 1997).

El helado puede hacerse con grasa de palmiste o coco porque ambas tienen un perfil de derretimiento similar al de la grasa láctea (punto de fusión 36.1°C) lo que permite su uso sin dejar un sabor grasoso al final de su consumo. Las grasas vegetales empleadas comúnmente son (Clarke, 2004):

- Grasa de coco. Es una masa de consistencia pastosa o fluida a temperatura ambiente (25°C), de color blanco o marfil, inodora, insípida o de sabor suave, no da sabores ni colores extraños. Punto de fusión 26.1°C.
- Grasa de palma. Es una masa de consistencia pastosa o fluida a temperatura ambiente (25°C), de color amarillo rojizo, con sabor agradable y suave. Punto de fusión 39.4°C.
- Grasa de palmiste. Es semisólido a temperatura ambiente (25°C), tiene ciertas similitudes con la grasa de coco, en cuanto a características y composición. Su punto de fusión varía entre los 25.9 y los 28°C.

- Mezcla de varias de ellas.

Sólidos de Leche no Grasos

Los sólidos lácteos no grasos (SLNG), mejoran la textura del helado, ayudan a dar cuerpo y dan resistencia durante el consumo del producto final, son capaces de permitir una saturación más alta sin la característica de nevado o textura en forma de escamas asociados con altos excesos, y puede ser una fuente barata de sólidos totales (Goff, 1992).

Los SLNG contienen lactosa, caseína, proteínas de suero de leche, minerales (cenizas), vitaminas, ácidos, enzimas, y gases de la leche o de los productos lácteos de la que se derivaron. Sin embargo, la mayoría de las formulaciones de helado ahora utilizan otra fuente o fuentes de sólidos lácteos no grasos o proteína de la leche para reemplazar la totalidad o una porción de sólidos de leche descremados, tanto por razones funcionales como económicas (Westerbeerk, 1996).

Las proteínas de la leche contenidas en los helados son de excelente valor biológico, ya que contienen todos los aminoácidos esenciales. Las proteínas de leche son importantes fuentes de triptófano y son especialmente ricas en lisina. No sólo son conocidas por ser completas en la composición de aminoácidos, pero la asimilación de las proteínas de la leche ingeridas son casi 5.6% más completas que para otras proteínas en general. Las proteínas y los aminoácidos esenciales en general no son deficientes en la dieta promedio de personas de países que consumen helados lácteos, aunque los grupos específicos, como los ancianos, pueden obtener la proteína necesaria por los helados lácteos (Goff y Hartel, 2013).

Las proteínas de la leche son bien conocidas por sus propiedades de formación de espuma, y durante la fabricación de helados lácteos, se incorpora aire a la fase de volumen de alrededor del 50%. Por lo tanto, no debe sorprender que las proteínas de la leche contribuyan a la estabilización de la interfaz de aire en los helados. Esta interfaz de aire es muy importante para la estructura global y la estabilidad estructural (Turan et al., 1999).

Edulcorantes

El consumidor generalmente desea un helado dulce. Como resultado, se añaden agentes edulcorantes a la mezcla del helado de crema en un cantidad por lo general de 12 a 17% en peso. Los edulcorantes mejoran la textura y el sabor del helado, realzan los sabores, y suelen ser la fuente más económica de sólidos totales (Marshall, 2003). Los más empleados son:

- **Sacarosa.** Es el azúcar más utilizado en los helados, está integrada por una glucosa cuyo carbono aldehídico se une al cetónico de la fructosa, estableciendo un enlace glucosídico beta (1,2). Tiene una alta solubilidad y es menos higroscópico que la fructosa (Badui, 2006). La sacarosa llega a representar el 80% del total de azúcares en la mezcla. No se puede pasar de esa proporción ya que daría un excesivo sabor dulce al producto.
- **Glucosa.** Monosacárido más abundante en la naturaleza, se obtiene de la hidrólisis controlada del almidón, se suele utilizar en la elaboración de helados hasta un máximo del 25% del total de azúcares. Tiene menor poder edulcorante que la sacarosa (Madrid y Cenzano, 2003).
- **Azúcar invertido.** Es el producto obtenido por la hidrólisis química o enzimática de la sacarosa. Está constituido por una mezcla de sacarosa, glucosa y fructosa. El adjetivo “invertido” se refiere al cambio del poder rotatorio que se observa durante dicha hidrólisis. Enzimáticamente puede lograrse mediante el uso de una invertasa, químicamente se involucra la ruptura del enlace acetal, adicionando un hidrogeno del agua a la fructosa y un oxígeno a la glucosa (Badui, 2006). El azúcar invertido tiene un alto poder edulcorante que limita su utilización como ingrediente en helados hasta un máximo del 25% del total de azúcares de la mezcla (Madrid y Cenzano, 2003).

Saborizantes

Es esencial que el helado tenga un sabor atractivo, los sabores usados en la elaboración del helado lácteo son usualmente suministrados como una solución de aroma con componentes de sabor. El saborizante es la sustancia o mezcla de sustancias de origen natural o sintética que se utilizan para proporcionar o intensificar el sabor o aroma de los productos. Comercialmente, los saborizantes se encuentran como líquidos en muy diversos disolventes y en emulsiones, en

polvos, encapsulados en almidón y otros polímeros y también como granulados (Badui, 2006; Clarke, 2004).

Agua

El agua es el medio en el cual todos los ingredientes son dispersos o disueltos. Durante la congelación y el endurecimiento la mayor parte del agua se convierte en hielo (Clarke, 2004).

Estabilizadores

El objetivo básico de un estabilizante es mantener la estructura típica del helado. Considerando la inestabilidad del sistema que constituye el helado, la adición de estabilizantes en la mezcla, resulta imprescindible para mejorar la textura y la resistencia a las fluctuaciones de temperatura (Mahaut et al., 2004).

Los estabilizadores también deben de tener un sabor limpio, neutral, que no se unan a otros sabores de helados, contribuir al colapso aceptable del helado, y proporcionar la textura deseable por el consumidor. Las limitaciones en su uso incluyen la producción de características de fusión indeseables, una viscosidad excesiva de la mezcla, y la contribución a un cuerpo empapado pesado. Aunque los estabilizadores aumentan la viscosidad de la mezcla, tienen poco o ningún impacto en el punto de congelación (Goff y Caldwell, 1991).

En el caso de los helados, los estabilizadores que más nos interesan son los sistemas complejos o mixtos que proporcionan propiedades de cremosidad, textura, agradable sensación en el paladar y una clara liberación del sabor en el producto (Rebollo 2008).

Para la formación del helado primero debe adicionarse el estabilizante a la fase líquida o semisólida, antes de dispersarle el aire. El estabilizante debe adsorberse en la superficie del líquido para disminuir la tensión superficial y para permitir la formación de una capa resistente que separe las burbujas de aire (Badui, 2006). Los estabilizantes más utilizados son los hidrocoloides.

Hidrocoloides. Son sustancias poliméricas dispersables en agua que incluyen proteínas como la gelatina y polisacáridos como almidón y gomas. Como característica principal y común se puede destacar que son moléculas altamente hidrofílicas que actúan sobre el agua

que se encuentra libre en el medio donde se aplican, llegando a reducir su movilidad y aumentando así la viscosidad del sistema. En este sentido la estructura del polímero es de gran importancia ya que de ella depende la capacidad de retención de agua (volumen de agua que puede llegar a incorporar) y, por lo tanto, las características reológicas y de textura que impartirá al producto terminado (Cubero et al., 2002).

La gelatina, una proteína de origen animal, se utiliza casi exclusivamente en la industria de los helados como un estabilizador, pero ha sido reemplazada gradualmente por polisacáridos de origen vegetal debido a su mayor eficacia y un menor costo (Marshall et al., 2003).

Los estabilizadores actualmente en uso son (Goff y Hartel, 2013; López-Franco, 2006):

- Carboximetil celulosa, derivada de los componentes voluminosos o fibra soluble de material vegetal.
- Goma de algarrobo (goma de semilla de algarrobo), que se deriva de los granos del árbol *Ceratonia siliqual*, que se cultiva principalmente en el Mediterráneo.
- Goma de guar, proviene de la zarza *Cyamopsis tetragonoloba*, un miembro de la familia de las leguminosas cultivadas en la India y Pakistán durante siglos y ahora cultivan de forma limitada también en los Estados Unidos.
- Goma xantana, un exopolisacárido bacteriano producida por el crecimiento de *Xanthomonas campestris*.
- Alginato de sodio, un extracto de un alga marina color marrón.
- Carragenina, un extracto de *Chondrus crispus* (musgo irlandés), un alga roja, originalmente cosechada en la costa de Irlanda, cerca del pueblo de Carragheen.
- La goma arábica, un polisacárido natural de alto peso molecular (350kDa) constituido por una cadena de polisacárido (95%) y una pequeña fracción (1-2%) de proteína.

Cada estabilizador tiene sus propias características, y, a menudo dos o más de estos estabilizadores se utilizan en combinación para prestar propiedades sinérgicas entre sí y mejorar su eficacia general. La goma guar, por ejemplo, es más soluble que la goma de algarrobo a temperaturas frías, por lo que tiene más aplicación en sistemas de pasteurización ATTC (Alta Temperatura/Tiempo Corto). La carragenina es un coloide secundario usado para prevenir que el suero salga fuera de la mezcla, que normalmente es promovido por uno de los otros estabilizadores, por lo tanto, se incluye en las formulaciones de estabilizadores más empleados (Marshall et al., 2003; Berger, 1997).

Una investigación reciente se ha centrado en la capacidad de algunos estabilizadores para formar un criogel y atrapar los cristales de hielo dentro del gel. La separación de fases de polisacáridos y proteínas también parece estar relacionado. Por lo tanto, el control de la recristalización de hielo puede relacionarse con diferencias microestructurales en la concentración de soluto en la superficie del cristal (Goff et al., 1999).

Emulsionantes

Por definición los emulsificantes son aquellas sustancias que, añadidas a los alimentos, hacen posible la formación y/o mantenimiento de una dispersión uniforme entre dos o más sustancias inmiscibles (Cubero et al., 2002).

Los emulsionantes se han utilizado en la fabricación de mezclas de helados lácteos durante muchos años. Por lo general, se integran con las propiedades de los estabilizadores, pero sus funciones y acciones son muy diferentes de los estabilizadores. Se utilizan para mejorar la calidad de batido de la mezcla, para la producción de un helado de crema seco para facilitar el moldeo, extrusión de lujo, y la producción de un sándwich, para dar un cuerpo más suave y una mejor textura al producto acabado, para calidades superiores de moldeo en el congelador, para producir un producto con buenas propiedades de levantado y resistencia al derretido, y para un mayor control exacto del producto durante la congelación y las operaciones de envasado (Krog, 1998; Goff y Jordan, 1989).

Función de los Componentes en una Formulación de Helados Lácteos

El helado se compone de una mezcla de aire, agua, grasa de leche o no láctea, sólidos lácteos no grasos, edulcorantes, estabilizantes, emulsionantes y saborizantes. Las funciones y las limitaciones de cada uno de estos componentes se describen en la Tabla 4. Una fórmula base de un helado es la mezcla no congelada de estos ingredientes, excepto los saborizantes y el aire (Goff y Hartel, 2013). La suma de los porcentajes de los ingredientes sólidos que componen la mezcla, tales como, el porcentaje de grasa, sólidos lácteos no grasos, azúcares, estabilizantes y emulsionantes, son los sólidos totales. El agua es un componente muy importante de la formulación base, cuya proporción habitual es del orden de 60 a 65% (agua = 100 – sólidos totales).

Tabla 4. Funciones y limitaciones de los componentes base de un helado lácteo.

Componente	Funciones	Limitaciones
Grasa de leche	Aumenta el sabor. Lubrica y aísla	Aumenta el costo y suaviza la textura. Puede limitar el consumo debido a las altas calorías y su efecto sobre la saciedad
Sólidos no grasos de la leche	Mejora el cuerpo y textura a través de la capacidad emulsionante y la capacidad de retener agua	Cantidades altas pueden causar sabor a cocido o salado
Edulcorantes	Disminuye el punto de solidificación. Imparte dulzor. Mejora el sabor y la textura	Exceso de dulzor.
Estabilizadores	Mejora la suavidad de la textura. Proporciona cuerpo. Mejora la vida de anaquel	Puede producir exceso de masticación. Aumenta la resistencia a la fusión
Emulsionantes	Promover la	Aumenta el potencial del

	desestabilización de la grasa, lo que lleva a sequedad, suavidad, y buenas propiedades de fusión	batido de la grasa
Saborizantes	Incrementa la aceptación	Intensidades pueden ser inaceptables

Fuente: modificada de Goff y Hartel, 2013

Los estabilizantes son un grupo de ingredientes (normalmente polisacáridos) que comúnmente se utilizan en las formulaciones de helados con el propósito de (Goff y Hartel, 2013):

- Aumentar la viscosidad de la mezcla.
- Estabilizar la mezcla y evitar la separación de fases.
- Ayudar en la suspensión de las partículas de saborizantes.
- Producir una espuma estable con corte fácil y la rigidez para el embalaje.
- Retardar o reducir el crecimiento de cristales de hielo y de la lactosa durante el almacenamiento, especialmente durante los períodos de fluctuación de la temperatura, conocido como choque térmico.
- Frenar la migración de la humedad del producto al paquete o al aire.
- Ayudar a evitar la contracción del volumen del producto durante el almacenamiento.
- Proporcionar uniformidad en el producto y la resistencia a la fusión.
- Para producir la suavidad en la textura durante el consumo.

Muchas de estas funciones se atribuyen a un aumento de viscosidad de la fase sin congelar en el helado. En esta fase crioconcentrada, se dice que los polisacáridos inducen la agregación de la caseína en una red tipo gel débil, que es parcialmente responsable de la estabilidad de los cristales de hielo y por lo tanto, de que la textura del helado durante su consumo, sea mejorada. Los estabilizadores también deben tener un sabor limpio, neutro, que no comprometa los sabores del helado, deben contribuir a un colapso aceptable del cristal de hielo, y proporcionar la textura deseable en el consumo. Algunas limitaciones en su uso incluyen un aumento de la viscosidad de la mezcla y la producción de características de fusión indeseables (Goff y Hartel, 2013).

La elección del más adecuado se realiza mediante la selección de los criterios que mejor corresponden a los objetivos del cliente. En esta elección se tienen en cuenta la fórmula, el proceso, las exigencias referentes al equipamiento (viscosidad, transferencias, envase: extrusión o a granel, condiciones de endurecimiento, almacenaje), el comportamiento frente a la fusión, el aspecto organoléptico y el precio. Además, si se aplican combinaciones en sobredosis, la consistencia del helado se torna viscosa, gomosa, pegajosa o espesa (Mundo helado, 2006).

La goma de mezquite, igual que la goma arábica, contiene una proporción pequeña de proteínas, del orden de 2.0 a 4.8 %, que son mezclas complejas con distintas estructuras químicas (Goycoolea et al., 2000), y son las responsables de las propiedades de emulsificación, debidas a que una capa de estas proteínas se absorbe en la interfase aceite-agua, que le proporciona una estructura que estabiliza a los coloides, en muchos alimentos (Dickinson, 1988).

La revisión de la literatura realizada en el presente estudio, mostró que no hay información sobre la capacidad estabilizadora de la goma de mezquite en helados lácteos.

Elaboración de Helados Lácteos

Mezclado

Durante el mezclado todos los ingredientes líquidos (leche, crema, leche concentrada, jarabe, etc.) se colocan en un tanque mezclador llamado cuba, y la agitación y el calentamiento se

ponen en marcha al mismo tiempo. Las cantidades de los ingredientes líquidos se pueden medir con una vara de medición calibrada, bombeando a través de un medidor de flujo volumétrico o de masa, o añadiéndolos directamente como volúmenes o pesos predeterminados (Goff y Hartel, 2013).

Los ingredientes secos, se pueden mezclar con los materiales líquidos sin grasa con un agitador emulsionante que está montado dentro del tanque mezclador. Una mezcla más eficaz se realiza con mezcladores de alto cizallamiento o con "embudos de polvo." Los mezcladores de alto cizallamiento que tienen una capacidad relativamente pequeña en comparación con la de un tanque de mezcla, suspenden los ingredientes secos en una pequeña porción de los componentes líquidos. La suspensión entonces se transfiere al mezclador (Goff y Hartel, 2013).

Los estabilizadores se dispersan mejor en una mezcla de baja actividad de agua (0,86 o inferior) tal como el azúcar líquido o jarabe de maíz con aproximadamente 70% de sólidos. Un azúcar líquido adecuado se puede hacer mediante la mezcla de azúcar y agua para hacer jarabe que contiene entre 66-68% de sólidos. El sorbitol y la polidextrosa funcionan adecuadamente. El estabilizador se puede añadir a una solución de este tipo en aproximadamente 12% en peso. En este sistema, el estabilizador debe de estar bien disperso se debe mezclar por no más de 1 min. Tiempos más largos ocasionan demasiada hidratación y una acumulación excesiva de viscosidad, por lo que la dispersión de la suspensión en el líquido se hace difícil (Goff y Hartel, 2013).

Homogeneizado

El objetivo principal de la homogeneización, es hacer una suspensión estable y uniforme de la grasa mediante la reducción del tamaño de los glóbulos de grasa a menos de aproximadamente 2 mm. Cuando una mezcla se homogeiniza adecuadamente, la grasa no se levantará y formará una capa de crema en el producto congelado, por lo que no tendrá un aspecto o una sensación grasosa o mantecosa. La grasa homogeneizada se desestabiliza muy lentamente en el congelador, entonces los emulsionantes son por lo general utilizados para proporcionar un control en la cantidad de desestabilización de la grasa, que da lugar a un producto congelado que es seco en apariencia y lento para derretirse. La homogeneización se realiza normalmente forzando la mezcla a través de un orificio muy pequeño en condiciones adecuadas de presión y

temperatura, usando una bomba de desplazamiento positivo para proporcionar la presión (Goff y Hartel, 2013).

La eficiencia de la homogeneización aumenta con el aumento de la temperatura hasta aproximadamente 80°C (176°F). Si la homogeneización precede a la pasteurización por varios segundos y cualquier parte de la mezcla se compone de leche cruda, la temperatura mínima para la homogeneización es de 60°C (140°F). A esta temperatura, la lipasa de la leche está prácticamente inactivada, asegurando que la lipólisis no tome lugar como una membrana de protección, que se elimina de los glóbulos de grasa durante la homogeneización. Además, las temperaturas más altas limitan la aglutinación de los glóbulos de grasa y reducen la energía necesaria para que funcione el homogeneizador (Goff y Hartel, 2013).

La eficiencia de la homogeneización se reduce cuando la válvula de homogeneización está en mal estado, puesto que la bomba no entrega el fluido a la velocidad diseñada (por lo general debido a que la válvula de admisión o de descarga está dañada o desgastada), o también debido a si la temperatura de la mezcla es baja, o hay aire presente en la mezcla. Minimizando las presiones de la homogeneización para mezclas con un mayor contenido de grasa, se conserva la energía y reduce los costos de operación. Cuando la práctica también reduce los requisitos para emulsionantes, los costes pueden reducirse aún más (Goff y Hartel, 2013).

Pasteurizado

El objetivo de la pasteurización de la mezcla es la destrucción de las bacterias patógenas, que tienen la capacidad de transmitir diversas enfermedades a los consumidores. El proceso de pasteurización fue desarrollado por Pasteur (por esto lleva su nombre), y consistía básicamente en someter a distintos alimentos a la acción del calor, para destruir cepas patógenas de microorganismos. Este principio comenzó a utilizarse en la leche, la cual se calentaba a 60°C durante 30 min. Investigaciones posteriores determinaron que se pueden utilizar distintas combinaciones de tiempo y temperatura. Así en nuestros días un proceso de pasteurización utilizado en lechería considera la aplicación de una temperatura de 72 a 75°C por un tiempo de 20 s. Esta condición además de ser más económica, evita someter la leche y otros alimentos a condiciones de temperatura tales que disminuyen sensiblemente su calidad nutricional (MAGyP, 2005).

En la elaboración de helados se aplica esta técnica en forma “obligatoria”, como modo de garantizar la calidad sanitaria de este alimento. El proceso completo de pasteurización incluye el rápido enfriamiento de la mezcla, es decir luego de someterla a la temperatura y tiempo indicado, la temperatura desciende rápidamente hasta los 4 o 5°C, impidiendo de este modo la multiplicación de las células sobrevivientes (MAGyP, 2005).

Las combinaciones más utilizadas son las siguientes:

- Pasteurización baja, utilizada originalmente por Pasteur, 30 min. a 60°C.
- Pasteurización intermedia a 72- 75°C durante 20 a 30 s.
- Pasteurización alta a una temperatura de 83 a 85°C durante 15 s.

En los helados se suele utilizar esta última ya que presenta varias ventajas:

- Proceso rápido y continuo aumentado sensiblemente la productividad.
- Temperatura alta que asegura la destrucción de los microorganismos patógenos.
- Sensible ahorro de energía.

Para grandes volúmenes de elaboración de helados es mucho más económico utilizar los sistemas “continuos” de pasteurización. (MAGyP, 2005).

Maduración

Una vez que la mezcla ha sido homogeneizada y pasteurizada, debe ser conducida a depósitos, a una temperatura de 4 o 5° C por un periodo de 4 a 5 horas. Este tiempo es fundamental para obtener los siguientes beneficios (MAGyP, 2005):

- Cristalización de la grasa.

- Tanto las proteínas como los estabilizantes absorben agua obteniendo una buena consistencia del helado.
- La mezcla absorberá mejor el aire que se le incorpora en el proceso de batido.
- Mayor resistencia al derretimiento.

En algunos casos y por razones de producción la mezcla puede permanecer en los tanques maduradores hasta 24 h sin riesgos para la calidad del producto.

Congelación

La congelación de la mezcla es una de las operaciones más importantes en la fabricación de helados, ya que la calidad, el sabor, y el rendimiento del producto final dependen de una congelación adecuada. Típicamente, la congelación de helados se lleva a cabo en dos pasos (Goff y Hartel, 2013):

- Congelación dinámica, donde la mezcla se congela rápidamente mientras se agita para incorporar aire y para limitar el tamaño de los cristales de hielo formados.
- Congelación estática, donde el producto parcialmente congelado se endurece sin agitación en un entorno especial de baja temperatura diseñado para eliminar el calor rápidamente.

Durante la congelación dinámica, donde se forman cristales de hielo, se produce tanto la dispersión de las burbujas de aire, así como, el reordenamiento de los glóbulos de grasa. Durante la congelación estática (a menudo llamada endurecimiento), los cristales de hielo formados previamente se hacen más grandes, de acuerdo con la disminución de la temperatura, pero en general, no se forman nuevos núcleos (Goff y Hartel, 2013).

El helado puede ser congelado en lotes o congeladores continuos. La distinción se basa a menudo en el tamaño de la empresa, con operaciones de mayor envergadura en general, al procesamiento del helado en congeladores continuos. Independientemente del tipo de congelador utilizado, los mecanismos generales que se producen para transformar la mezcla de

helado en un producto congelado de alta calidad, son prácticamente los mismos. Además de la formación de cristales de hielo, se incorpora aire normalmente en la etapa dinámica, aunque a veces la mezcla del helado puede ser pre-batida antes de la congelación. Al mismo tiempo que los cristales de hielo se forman y se está incorporando aire, los glóbulos de grasa se someten a la desestabilización, lo que conduce a la coalescencia parcial y la formación de grumos de los glóbulos de grasa. Estos grumos de grasa ayudan a promover la incorporación de aire y la estabilización de las pequeñas burbujas de aire incorporadas durante el batido de la mezcla (Goff y Hartel, 2013).

Al final del proceso de congelación, ya sea por lotes o continua, el helado se congela sólo parcialmente. A menos que se esté elaborando un producto suave, el helado que sale del congelador de superficie rugosa se llena en paquetes, que luego se envía a través de una etapa de endurecimiento (o congelación secundaria), donde el hielo adicional y el helado se vuelven duro (Goff y Hartel, 2013).

Aspectos Generales del Árbol del Mezquite (*Prosopis spp*)

El árbol del mezquite (*Prosopis spp*) es una planta leguminosa que pertenece a la familia *Mimosoideae*, distribuidos en las zonas áridas y semiáridas del mundo. A las especies de *Prosopis* se les conocen con el nombre común de mezquite en América del Norte (Mirhosseini H. *et al.*, 2012).

La población de mezquite (*Prosopis spp*) ocupa cerca del 50% de la superficie de las zonas áridas y semiáridas de México. Otros reportes indican una superficie de 3'555,500 ha., comúnmente en lugares áridos y semiáridos (INECC, 1994).

La goma de mezquite (*Prosopis spp*), por sus características fisicoquímicas semejantes a la goma arábica (*Acacia spp*), su aplicación se puede extender en la industria de los alimentos, farmacéutica y cosmética (López-Franco *et al.*, 2012).

Características Físicoquímicas y Estructurales de la Goma de Mezquite (*Prosopis spp*)

La goma de mezquite (*Prosopis spp*) es un proteoglicano de alto peso molecular, ligeramente ácido, heterogéneo y polidisperso. Está constituida por L-arabinosa, D-galactosa, como principales carbohidratos y trazas de D-glucosa, D-manosa, D-xilosa y ácido glucurónico, y una fracción proteica que oscila entre 2 y 4.8%, que tiene un papel importante en las propiedades emulsificantes del polisacárido (López- Franco *et al.*, 2004).

Algunas propiedades físicoquímicas coinciden con las de la goma arábiga (*Acacia spp*), es decir, ambas son proteoglicanos que tienen la misma identidad inmunoquímica, son altamente solubles en agua y forman estructuras globulares compactas. En solución acuosa, estas estructuras globulares proporcionan la capacidad de reducir la tensión superficial, actuando como estabilizador y emulsionante sin un aumento significativo de la viscosidad. Estas propiedades son la base de la aplicabilidad de la goma arábiga (*Acacia spp*), que tiene mucha demanda en las industrias de alimentos (López-Franco *et al.*, 2012). Las características químicas de la goma de mezquite (*Prosopis spp*) se describen en la Tabla 5:

Tabla 5. Características químicas de la goma de mezquite (*Prosopis spp*).

Parámetro	%
Humedad	10.00
Cenizas	2.61
Taninos	0.35
Nitrógeno total	0.70
Proteína	3.73
Azúcares totales	93.13
Arabinosa	71.00
Galactosa	26.00
Ácidos urónicos	3.00

Fuente: CONAFOR, 2002.

Propiedades Funcionales de la Goma de Mezquite (*Prosopis spp*)

La goma de mezquite (*Prosopis spp*) comparte muchas características fisicoquímicas con la goma arábica (*Acacia spp*), dentro de las cuales se resaltan las siguientes (CONAFOR, 2002):

- Solubilidad: la goma de mezquite (*Prosopis spp*) se disuelve más rápido que la goma arábica (*Acacia spp*) y a su vez acelera la dispersión de los ingredientes, es altamente soluble en agua (con concentraciones de hasta 50% (p/v)), e insoluble en aceites y solventes orgánicos. También atrapa de mejor forma los compuestos aceitosos y los productos obtenidos son más estables en color y sabor. Las soluciones de goma de mezquite son de color amarillo claro hasta café.
- Viscosidad: presenta baja viscosidad en altas concentraciones. Soluciones al 20%, presenta un comportamiento Newtoniano (su viscosidad puede considerarse constante en el tiempo), y soluciones al 50%, presentan comportamiento no Newtoniano. Dependiendo del pH, la viscosidad aumenta o disminuye: pH normal: 4.5-5.5, pH=6 aumenta, pH=9 disminuye.
- Carácter emulsificante: tiene capacidad emulsificante por la proteína que posee, forma y estabiliza emulsiones aceite-agua.
- Habilidad encapsulante: excelente en encapsular aceites esenciales, saborizantes y colorantes. Así como, para regular la humedad, migración de gases e incorporación de lípidos.
- Compatibilidad: puede usarse en combinación con la goma arábica (*Acacia spp*), maltodextrina, lípidos, proteínas vegetales y animales y quitosano. Tiene efecto sinergista.

Características Fisicoquímicas y Estructurales de la Goma Arábica (*Acacia spp*)

La goma arábica (*Acacia spp*) es un complejo polisacárido arabinogalactano, que contiene cerca del 2% de proteína, que se obtiene de un exudado pegajoso proveniente de los tallos y ramas de los árboles del género *Acacia* cuando se someten a estrés (Idris et al., 1998).

Como un heteropolisacárido que contiene una pequeña cantidad de material proteico (2%) (Williams y Phillips, 2000), la parte de hidratos de carbono de la goma arábiga tiene una estructura altamente ramificada que consiste de un cadena 1,3- ligada a un núcleo de beta-D-galactosa con extensas ramificaciones 3- y 6- ligadas a galactosa y 3- ligadas a arabinosa. Las unidades restantes incluyen galactopiranososa, arabinopiranososa, arabinofuranosa, ramnopiranososa, ácido urónico glucopiranosol, y ácido urónico 4-O-metilglucopiranosol (Idris et al., 1998).

El mayor componente de la goma arábiga (*Acacia spp*) es el arabinogalactano (AG), el cual representa el 90% del total de la goma. Recientes investigaciones sugieren que la molécula de la fracción AG es un elipsoide delgado y plano (Sanchez et al., 2008). Esto es consistente con previas hipótesis y explicaciones de que las moléculas altamente ramificadas de AG son esféricas con un comportamiento newtoniano en soluciones acuosas. El componente arabinogalactano proteico (AGP) representa alrededor del 10% del total de la goma y contiene 12% de proteína, y ha mostrado tener una estructura “tipo flor de acacia”, en la cual el grupo de carbohidratos están ligados a una cadena de polipéptido (Fincher et al., 1983).

El componente AGP ha mostrado ser el responsable las características emulsificantes de la goma arábiga (*Acacia spp*). Residuos de azúcares hidrofílicos y aminoácidos hidrofóbicos en el AGP contribuyen a la actividad interfase de la goma arábiga (*Acacia spp*). La viscosidad estable y modular de las soluciones de goma arábiga (*Acacia spp*) también pueden influenciar al cambiar la proporción de la fracción de AGP en la goma (Al-Assaf et al., 2007).

La goma arábiga (*Acacia spp*) ha sido extensamente estudiada y utilizada por sus propiedades nutricionales y de superficie, en alimentos, farmacéuticos, cosméticos o para tintas, etcétera (Li et al., 2009).

Propiedades Funcionales de la Goma Arábiga (*Acacia spp*)

La goma arábiga (*Acacia spp*) existe en la naturaleza como una sal neutra o ligeramente ácida de un polisacárido complejo conteniendo calcio, magnesio y potasio. Se trata de un material heterogéneo y puede estar compuesto de varias especies moleculares ligeramente diferentes, lo que le da ciertas propiedades como (Gracia, 1998):

- Solubilidad: debido a su extrema solubilidad en agua, la goma arábica (*Acacia spp*) es única entre los hidrocoloides naturales. La mayor parte de las gomas comunes no se pueden disolver en agua a concentraciones superiores al 5% debido a sus altas viscosidades. Sin embargo, la goma arábica (*Acacia spp*) puede producir soluciones hasta con 50% de concentración. En estos altos niveles, puede formar una masa gelatinosa altamente viscosa, similar en características a las de un gel fuerte de almidón.
- Viscosidad: mientras que la mayor parte de las gomas forman soluciones altamente viscosas a bajas concentraciones, entre el 1% y el 5%, la goma arábica (*Acacia spp*) es excepcional por su extrema solubilidad y por no impartir gran viscosidad a bajas concentraciones. Las altas viscosidades que imparte la goma arábica (*Acacia spp*) solo se consiguen hasta que la concentración es de aproximadamente 40% a 50%. Esta habilidad para formar soluciones altamente concentradas es responsable de las excelentes propiedades estabilizantes y emulsionantes de la goma arábica, cuando se incorpora con grandes cantidades de materiales insolubles.
- Comportamiento reológico: a concentraciones de 40%, las soluciones de goma arábica (*Acacia spp*) presentan un comportamiento típicamente Newtoniano. Arriba del 40%, las soluciones pueden adquirir características pseudoplásticas, o bien, que se puede observar un decremento en la viscosidad con aumento en el esfuerzo cortante.
- Capacidad emulsionante: la goma arábica (*Acacia spp*) es un agente emulsionante muy efectivo debido a su función de coloide protector que ha encontrado amplio uso en la preparación de emulsiones alimenticias de aceite en agua. La goma arábica (*Acacia spp*) produce emulsiones estables con la mayor parte de los aceites en un amplio rango de pH y en presencia de electrolitos, sin la necesidad de un agente estabilizante secundario.
- Compatibilidad: las soluciones de goma arábica (*Acacia spp*) precipitan con muchas sales, particularmente sales metálicas trivalentes. La goma arábica (*Acacia spp*) es incompatible con algunas gomas como la grenetina y el alginato de sodio, pero es bastante compatible con carboximetilcelulosa. En muchos casos, la compatibilidad está sujeta a la influencia del pH y de la concentración. La compatibilidad de la goma arábica (*Acacia spp*) con otros componentes se puede obtener mediante el ajuste adecuado de estos parámetros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de la Materia Prima

La goma de mezquite (GM) se adquirió en el municipio de Rayón, en el estado de Sonora, una parte proveída por recolectores y otra parte comprada a proveedores locales (Figura 2). En este municipio predominan dos variedades de *Prosopis*, a saber, *Prosopis velutina* y *Prosopis glandulosa* var. *Torreyana* (Goycoolea et al., 1997). Los nódulos que estaban en un recipiente de plástico con tapa roscada, se trasladaron al laboratorio de Fisicoquímica de Alimentos del DIPA de la Universidad de Sonora. La goma arábica (GA), se adquirió con un proveedor de ingredientes y aditivos para alimentos en la ciudad de Hermosillo, Sonora. La goma en polvo estaba en bolsas de polietileno engrapadas a la etiqueta.

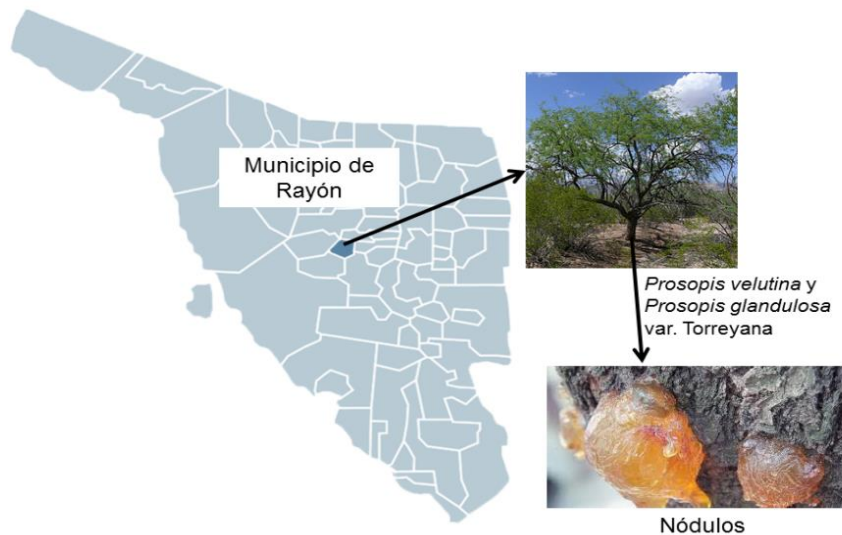


Figura 2. Área de muestreo de la GM

Clarificación de la Goma de Mezquite (*Prosopis spp*)

La GM se disolvió en agua en una proporción de 50/100 agua (p/p) mediante agitación con imanes y una placa agitadora. Se separaron las impurezas que contenía, mediante una serie de filtraciones de la solución: La primera filtración se realizó con un embudo de cristal de tamaño

mediano y un medio filtrante con tamaño de poro de 11 micras (Whatman No. 1) y las siguientes dos filtraciones se realizaron a vacío (12 lb/plg²) con un embudo Buchner de cristal a través de medios filtrantes con tamaño de poro de 2.5 micras y 0.45 micras (Whatman No. 42 y Whatman NL 17, respectivamente). El filtrado, se liofilizó, pesó y almacenó en un recipiente a temperatura ambiente (Figura 3).

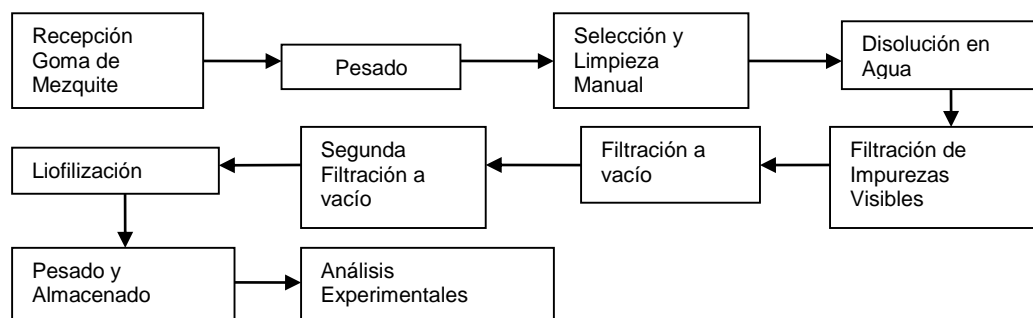


Figura 3. Diagrama de flujo de la clarificación de la GM

Composición Química

Contenido de Proteína

El contenido de proteína se determinó usando el método de combustión o método Dumas (López-Franco et al., 2012). La liberación de nitrógeno se lleva a cabo mediante pirólisis en una cámara de combustión, el nitrógeno es transportado con la ayuda de un gas hacia un detector en donde se realiza la medición. El equipo que se utilizó fue el Leco FP-528 que consta de una cámara de oxígeno donde se lleva a cabo la combustión a una temperatura de 850°C, una celda de termoconductividad y un microprocesador para llevar a cabo los cálculos y controlar los parámetros operativos. El tiempo de análisis para una muestra fue de aproximadamente 3 minutos y los resultados se expresaron como % de proteína, de acuerdo al factor de conversión, que para la goma de mezquite fue 6.53 (Anderson y Morrison, 1989) y para la goma arábiga fue 6.6 (Osman et al 1993).

Contenido de Cenizas

El contenido de materia inorgánica se obtuvo después de quemar 3 g de muestra en una mufla programable Vulcan 3-550, a 600°C por 3 horas (López-Franco, et al., 2012).

Contenido de Taninos

La cantidad de taninos presentes en la muestra se determinó usando el método espectrofotométrico recomendado para gomas que contienen taninos (Anderson y Morrison 1989), que consiste en añadir 0.1 mL de solución de cloruro férrico (9 g de cloruro férrico hexahidratado en 100 mL de agua) a 10 mL de una solución de goma al 2%. El contenido de taninos se cuantificó mediante colorimetría a 430 nm en un espectrofotómetro UV-VIS Cary 50. Se utilizó ácido tánico como patrón de referencia para la construcción de la curva de calibración.

Contenido de Agua y Polisacáridos

El contenido de agua y de polisacáridos se pudo cuantificar por medio del análisis del patrón de desorción del agua y de la descomposición de los polisacáridos, respectivamente (Mothè y Rao, 2000; Zohuriaan y Shokrolahi, 2004), por termogravimetría. El patrón de descomposición y de desorción del agua de las gomas se analizó usando un analizador termogravimétrico Pyris 1 TGA de Perkin-Elmer. Se pesaron aproximadamente 4 mg de muestra y las mediciones se realizaron a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en atmósfera de nitrógeno (20 mL/min), desde 20°C hasta 600°C. Las curvas TGA registran el peso de la goma al calentarse a una velocidad controlada en función de la temperatura o del tiempo.

Determinación de las Características Fisicoquímicas del Sistema Agua-Goma

Viscosidad Dinámica

La viscosidad se midió usando un reómetro Anton Paar (Physica MCR 102, Austria), equipado con un sistema de cilindros concéntricos con un baño con control de temperatura. Se transfirió 1 mL de la solución de agua/goma (0.2 y 0.4% p/V) al cilindro contenedor del reómetro, se puso en contacto con el cilindro cizallante durante 2 minutos para conseguir el equilibrio a la temperatura de 25 °C. Las curvas del flujo (velocidad de corte, $\dot{\gamma}$, versus esfuerzo de corte, τ) se

obtuvieron utilizando una velocidad de corte creciente: 0.1-100 s⁻¹ en 3 minutos. Las curvas del flujo experimentales siguieron el modelo de ley de potencia: $\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$, donde k es el coeficiente de viscosidad (Pa·sⁿ), es decir, el esfuerzo de corte a una velocidad de corte de 1 s⁻¹; el exponente n es el índice del comportamiento del flujo, que refleja la cercanía al flujo newtoniano y es adimensional (n<1 corresponde a un comportamiento de fluidización por cizalla, n>1 corresponde a un comportamiento de espesamiento por cizalla, y n=1 corresponde a un comportamiento newtoniano) (Rao, 2007). Los datos se procesaron en el software Start Rheoplus integrado al equipo. Para todas las muestras se realizó una medida de la viscosidad (η , en Pa.s), a una velocidad de cizalla de 100 s⁻¹.

Tensión Superficial

La tensión superficial de la interfase aire-agua se midió usando el método descrito por Izydorczyk et al (1991). La disminución de la tensión superficial (mN / m) del agua con el aumento de la concentración de la goma se midió por el método del anillo de Du Nouy usando un tensiómetro (CSC Scientific DuNouy Precision Tensiometer-70535). Se midió la fuerza que actúa sobre el anillo cuando se mueve hacia arriba desde la superficie de la solución goma-aire. El instrumento se calibró siguiendo las instrucciones del manual del equipo utilizando el valor de la gravedad para la ciudad de Hermosillo es 979.2 cm/s². Las soluciones de goma con concentraciones de 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5% (p/v), se colocaron en una caja Petri (10 cm de diámetro y 1.5 cm de profundidad) y se registraron los cambios en la tensión superficial a 25 ± 0.5 °C. El valor de la tensión superficial fue el promedio de diez mediciones.

Propiedad Emulsionante de la Solución Agua/Goma de Mezquite (*Prosopis spp*) y Goma Arábiga (*Acacia spp*)

Se determinó la actividad de emulsión (AE) y el índice de estabilidad de la emulsión (IEE) formada con grasa butírica fundida según el método modificado de Khan et al. (2015), que implica la formación de una emulsión y a continuación, la determinación de la turbidez a 500 nm, en un espectrofotómetro UV-VIS Cary 50. La emulsión se preparó con 3 mL de las soluciones de agua/goma (0.2 y 0.4% p/V) y 1 mL de grasa butírica fundida a 37°C ± 1.5 °C, utilizando un homogeneizador WhiseTis Homogenizer (HG-150) a 12,000 rpm, durante un minuto a 37°C ± 1.5 °C. Posteriormente, se tomaron del fondo del tubo de ensayo, alícuotas de 100 µL de la emulsión a los 0, 1, 2, 3, 5, 10, y 20 min e inmediatamente se diluyó con 5 mL de

una solución al 0.1% de dodecil sulfato de sodio. Se determinó la absorbancia de la emulsión a 500 nm. La AE refleja la capacidad del hidrocoloide para crear emulsiones de aceite-en-agua, por lo que se determinó a partir de la absorbancia medida inmediatamente después de formada la emulsión.

La estabilidad de la emulsión se obtuvo mediante la determinación de la vida media de la disminución de la turbidez de la emulsión mediante la ecuación $IEE \text{ (min)} = [A_0 / (A_0 - A_{10})] t$, donde t es el tiempo de reposo de la emulsión (en minutos), A_0 y A_{10} son las absorbancias de las emulsiones después de 0 y 10 min de reposo, respectivamente.

Determinación del Efecto de la Adición de Goma de Mezquite (*Prosopis spp*) y de Goma Arábiga (*Acacia spp*) en las Propiedades de la Congelación y la Descongelación de una Solución Agua-Goma

Se usaron dos concentraciones de goma en agua, 0.2% y 0.4%, y de la curva de congelación de la solución, se estableció el punto de congelación y el tiempo de congelación. Para obtener el perfil del proceso de congelación, 100 mL de las soluciones agua/goma se prepararon en vasos de plástico que se colocaron en un congelador ($-18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) y se registró el valor de la temperatura por medio de una sonda de un termómetro digital, colocado en el centro térmico de la solución (Figura 4). La temperatura se registró cada minuto, iniciando a 25°C y terminando a -15°C . La temperatura de inicio de la congelación fue la temperatura a la que la velocidad del cambio de temperatura es mínima y que indica el comienzo de la formación de cristales de hielo (punto de congelación). El tiempo de congelación experimental de cada solución fue tomado cuando la lectura del sensor estaba en -15°C . Se obtuvo también, la velocidad de congelación, que el Instituto Internacional del Frío (IIF, siglas en inglés) la define como la diferencia entre la temperatura inicial y final del producto dividido por el tiempo de congelación (Martinez-Romero, et al. 2003).

Las soluciones congeladas se descongelaron en un baño de agua a $40^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ hasta que la temperatura en el centro térmico alcanzó esa temperatura. El cambio de temperatura, se registró con la ayuda de un termómetro digital con una sonda insertada en el centro de la masa congelada (Figura 4). El registro de la temperatura se realizó cada 30 segundos, iniciando a -15°C y terminando a 40°C , que es la temperatura máxima promedio del ambiente en el verano, en la ciudad de Hermosillo, Sonora. La temperatura de descongelación fue la temperatura a la

que la velocidad del cambio de temperatura es mínima y que indica el comienzo de la fusión de cristales de hielo (cambio de fase). El tiempo de descongelación experimental fue el tiempo necesario para que la solución pasara de una temperatura de -15°C a 40°C . Las concentraciones de goma que se probaron (0.2% y 0.4%) son las habituales para estabilizantes en las formulaciones de helados de crema (Goff y Hartel, 2013).

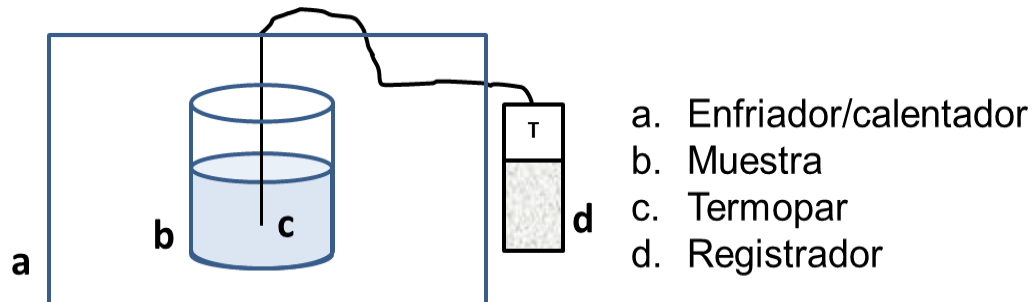


Figura 4. Esquema del sistema para obtener las características de congelación y descongelación

Determinación del Efecto de la Adición de Goma de Mezquite (*Prosopis spp*) y de Goma Arábiga (*Acacia spp*) a una Formulación Láctea para Helado, en las Propiedades de la Congelación y la Descongelación

Se estudió el efecto que tiene la adición de la GM y de la GA en una formulación láctea, en las propiedades de la congelación y la descongelación de las mezclas que se muestran en la Tabla 6. Las proporciones de sólidos totales y de las gomas se decidieron tomando en consideración el promedio de los niveles más altos y bajos de estabilizantes y de sólidos totales en formulaciones de helados lácteos, publicados por Goff y Hartel (2013), debido a que la NMX-F-714-COFOCALEC-2012 especifica grasa butírica (2% mínimo), proteínas propias de la leche (1.5% mínimo) y sólidos totales (20 mínimo), sin separar la proporción de los estabilizantes. La formulación láctea comercial contenía 26% de grasa butírica, 26% de caseína, 39% de azúcares (lactosa, sacarosa, maltosa, fructosa, maltitol y sorbitol), 3.5 % de minerales (potasio, calcio, fósforo, sodio, magnesio, zinc) y 3.7 % de vitaminas (ácido pantoténico, riboflavina, retinol, folacina, cobalamina y calciferol).

Tabla 6. Proporciones de sólidos totales y de GM y de GA (% p/V) en las mezclas para caracterizar su congelación y descongelación.

Goma (%)	Sólidos (%)	Agua (%)
0.2	33.0	66.8
	39.0	60.8
0.4	33.0	66.6
	39.0	60.6
0.0	33.0	67.0
	39.0	61.0

Para el establecimiento de la temperatura de congelación, el tiempo de congelación, la temperatura de descongelación y del tiempo de descongelación, se procedió como se explicó antes, para determinar el efecto de la concentración de goma en los parámetros de la congelación y la descongelación del agua (Figura 4).

Determinación de la Adición de la Goma de Mezquite (*Prosopis spp*) y de la Goma Arábica (*Acacia spp*) en la Cantidad de Hielo que se Formó en la Congelación de la Solución Agua/Goma y en la Mezcla Agua/Formulación Láctea/Goma

La cantidad de hielo que se formó durante la congelación de la solución agua/goma y de la mezcla agua/formulación láctea/goma, se predijo utilizando la cantidad de agua en la solución o la mezcla no congelada y la temperatura de inicio de la congelación observada en las curvas de congelación, por medio del siguiente procedimiento (Schwartzberg et al., 2007; Cleland y Valentas 1997):

- 1) Se consideró que la actividad de agua es 1
- 2) Se calculó la fracción molar de agua en el alimento no congelado, X_{anc} :

$$\ln(X_{anc}) = - \frac{18.02 \Delta H_o (T_o - T)}{RT_o^2}$$

ΔH_o = Calor latente de fusión del agua pura (333.6 kJ/kg)

T_o = Temperatura de fusión del agua pura (273°K)

T = Temperatura de inicio de la congelación (°K)

R = Constante de los gases ideales (8.314 kJ/kmol°K)

18.02 = peso molecular del agua (kg/kmol)

- 3) Se calculó el peso molecular de los solutos en el alimento, M_s , por medio de la ecuación para calcular fracción molar del agua en el alimento no congelado X_{anc} :

$$M_s = - \frac{18.02 X_{anc} (1 - x_{ao})}{x_{ao} (1 - X_{anc})}$$

x_{ao} = fracción en peso de agua en el alimento

- 4) Se calculó la fracción en peso de agua ligada, x_{al} :

$$x_{al} = b x_s = b (1 - x_{ao})$$

$b = 0.25$ kg de agua ligada / kg de soluto (Cleland y Valentas 1997)

x_s = fracción en peso de sólidos en el alimento

- 5) Se calculó la fracción en peso de agua congelable, x_{ac} :

$$x_{ac} = x_{ao} - x_{al}$$

- 6) Se calculó la fracción en peso de hielo en el alimento, X_h (Schwartzberg et al., 2007):

$$x_h = (x_{ao} - B x_s) \left[\frac{T_{ic} - T}{T_0 - T} \right]$$

$$B = b - 0.5 \frac{18.02}{M_s}$$

B = kg de agua ligada/kg de soluto

T_{ic} = temperatura de inicio de la congelación (°C)

T = temperatura del alimento congelado (°C)

T_0 = Temperatura de fusión del agua pura (0°C)

Diseño de Experimentos y Análisis Estadístico

Para determinar las características fisicoquímicas y los parámetros de la congelación y la descongelación de la solución agua-goma, se realizó un diseño factorial de dos vías, cuyas variables experimentales fueron:

- Tipo de goma con dos niveles, mezquite y arábica

- Concentración de goma con tres niveles, 0%, 0.2% y 0.4%

Para conocer el efecto de la goma de mezquite adicionada a una formulación láctea para helado, en las propiedades de la congelación y la descongelación, se realizó un diseño factorial con tres variables experimentales:

- Tipo de goma con dos niveles, mezquite y arábica
- Concentración de goma con tres niveles, 0%, 0.2% y 0.4%
- Concentración de fórmula láctea con dos niveles, 33% y 39%

Los tratamientos se realizaron con dos réplicas. Las variables respuesta fueron: tensión superficial, actividad de emulsión, estabilidad de la emulsión, viscosidad, tiempo de congelación, temperatura de congelación, tiempo de descongelación y temperatura de descongelación. Se efectuó un análisis de varianza para saber si las diferencias entre las respuestas se debieron a los diferentes tratamientos. Para cada experimento factorial, se observó si el valor de p de las interacciones fue menor que 0.05 para determinar si los efectos de un factor dependieron de los niveles del otro factor. En todos los casos, el nivel de las diferencias se obtuvo por medio de la prueba de comparación de las medias de Tukey. Todos estos análisis se realizaron utilizando el paquete estadístico JMP versión 5.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de Proteína, Taninos y Cenizas de la Goma de Mezquite (*Prosopis spp*) y de la Goma Arábica (*Acacia spp*)

En la Tabla 7 se muestran los resultados de la determinación del contenido de taninos proteína y cenizas de la GM y de la GA.

Tabla 7. Valores promedio y desviación estándar (n = 3) del contenido (%) de proteína, taninos y ceniza de la GM y de la GA comercial.

	Proteína (%)	Taninos (%)	Cenizas (%)
GM	5.82 ± 0.32	0.36 ± 0.01	2.55 ± 0.02
GA	4.71 ± 0.52	0.44 ± 0.02	3.78 ± 0.03

El contenido de proteína de la GM fue mayor que los encontrados en estudios previos para gomas colectadas en el Estado de Sonora: 3.5 ± 0.4% (Goycoolea et al, 1997), 3.73 % (López-Franco et al, 2008), pero menor que el estudio realizado por López-Franco et al, 2012, con un contenido de 6.66 ± 0.32%. Por el contrario, el contenido de proteína determinado en la GA fue similar a los encontrados en otros estudios (Goycoolea et al, 1997; López-Franco et al, 2012). En estudios de comparación entre clases de goma de mezquite, el contenido de proteína se relaciona con el contenido de impurezas y se menciona que, a menor contenido de proteína mayor proporción de impurezas (López-Franco et al, 2012). Se puede decir que los componentes de la glicoproteína de la GM clarificada tienen tamaños moleculares ≤ 0.45 micras.

La GM tuvo menor proporción de contenido de taninos que la GA y su valor se compara al reportado para gomas clarificadas por filtración (0.36%), pero su contenido fue menor que el de la goma clarificada por ultrafiltración (0.41%) (López-Franco et al, 2012). El procedimiento de clarificación por ultrafiltración a 0.45 micras fue eficaz para la eliminación de taninos hasta un límite determinado, que es entre 0.5-0.6%. Por otra parte, la GA resultó tener un mayor porcentaje de taninos (0.44%) sobrepasando el límite permitido que para postres congelados es

de 0.4% (FDA, 2016), lo que implica que debe restringirse el uso de la goma arábica comercial en este tipo de productos. El proceso de clarificación utilizado en este estudio, fue adecuado para que la GM tuviera un nivel de taninos permitido por la FDA.

El contenido de cenizas totales, está dentro de los límites (hasta un 4%) para su uso en alimentos y productos farmacéuticos (Mbuna y Mhinzi de 2003).

Contenido de Agua y Polisacáridos

En la Figura 5, se observa que el patrón de descomposición de las gomas fue multietapas con un comportamiento similar. La primera pérdida de peso de la muestra (etapa 1) se atribuye a la desorción del agua unida por puentes de hidrógeno a la estructura de los polisacáridos (Zohuriaan y Shokrolahi, 2004). Esto permite obtener el contenido de agua (% p/p) de las gomas, por medio de la integración del área de los picos que resultaron al derivar los datos de los termogramas primarios. Los valores así obtenidos, se muestran en la Tabla 8, donde se observa que el contenido de agua en la GM fue 2% más bajo que en la GA. El resultado del cálculo del área del pico en el rango de temperatura de 200 a 400°C (etapa 2), que en las dos gomas es la más grande, muestra que la mayor proporción de polisacáridos que se descomponen es 5% más alta en la goma de mezquite que en la goma arábica, y que la diferencia en la cantidad de polisacáridos en el rango de 400 a 600 °C (etapa 3) es 1% más alta en la GM. Con estos datos se puede decir que la GM contenía 79% de polisacáridos y la GA 73%. Los polisacáridos que se descomponen en la etapa 2 pudieran ser los de la fracción arabinogalactano proteico, que en las dos gomas contienen la mayor proporción de proteína (Li et al., 2009; Orozco-Villafuerte et al., 2003; Lopez-Franco et al., 2012). La cantidad de residuos a 600 °C fue 4% más alta en la GA que en la GM, y se puede decir que en su mayoría es carbón vegetal (Zohuriaan y Shokrolahi, 2004) y minerales (Tabla 8).

La degradación térmica de los polisacáridos, es un proceso complejo que incluye muchas reacciones diferentes que ocurren simultáneamente, por ejemplo, deshidratación, despolimerización, fragmentación, reordenación, repolimerización, condensación y carbonización (Patwardhan et al., 2011). Se sabe que las transiciones asociadas a la pérdida de humedad corresponden a la naturaleza hidrófila de los grupos funcionales del polímero (Zohuriaan y Shokrolahi, 2004), por lo que se podría suponer, que la estructura polimérica de la GM tenía una menor cantidad de grupos hidrófilos expuestos para la adsorción de agua. Sin

embargo, esa hipótesis no se puede considerar totalmente, ya que las circunstancias del manejo de las gomas fueron diferentes. La GM fue clarificada en el laboratorio e inmediatamente después de la liofilización, se almacenó en un recipiente con cierre hermético; y la GA, que se adquirió en el comercio local, estaba en bolsas de polietileno engrapadas a la etiqueta, por lo que pudo adsorber agua. Es necesario realizar estudios de la estructura de las gomas, para informar sobre las diferencias de estas interacciones agua-goma.

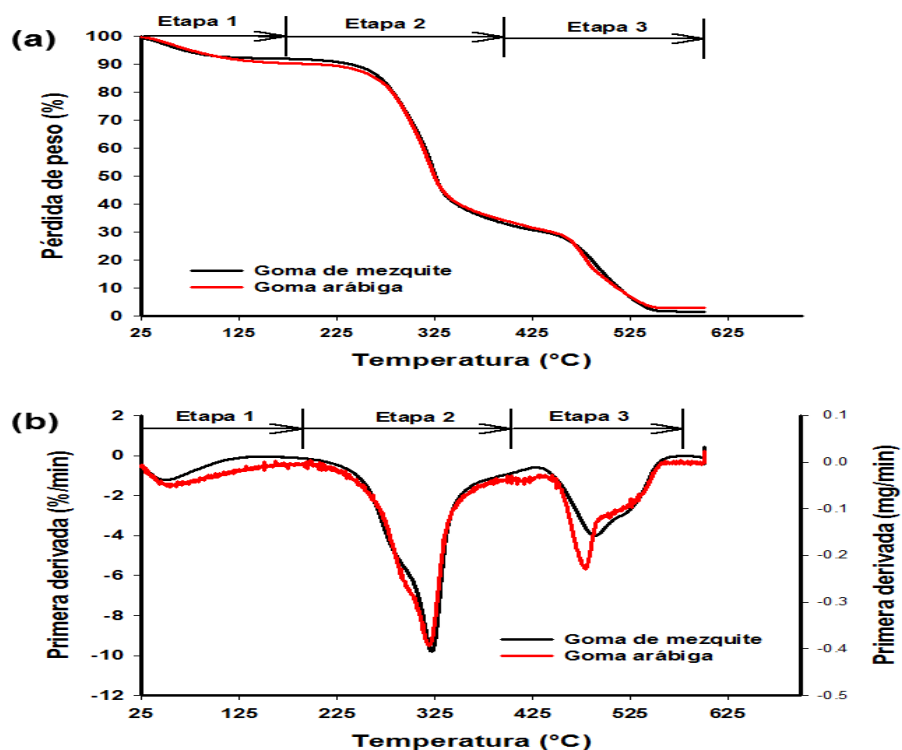


Figura 5. Curvas de TGA (a) y sus derivadas (b) de la GM y de la GA. Etapa 1: Desorción del agua, Etapa 2: Primera degradación de las gomas, Etapa 3: Segunda degradación de las gomas

La termolabilidad de los polisacáridos que no son almidón, se relaciona con el grado de ramificación y con la proporción de los residuos de monosacáridos que las forman (Patwardhan et al., 2011); Simões et al., (2014), informaron que los polisacáridos altamente polimerizados y sin ramificaciones, como la celulosa, tienen la mayor pérdida de peso a las temperaturas más altas, porque promueven un mayor número de enlaces de hidrógeno entre- e inter-cadenas, que los polisacáridos más ramificados, que se descomponen a temperaturas menos altas, como los

galactomananos, que éstos a su vez, son más termoestables que los arabinogalactanos. Con ésta información y con los datos de la temperatura máxima del pico en la Tabla 8 se puede suponer que la GM contenía más arabinogalactanos que la GA. Pero se requieren estudios de la estructura de los polisacáridos para confirmar esta suposición.

Tabla 8. Datos termogravimétricos obtenidos de la GM y de la GA en el TGA durante el calentamiento a 10°C/min, bajo atmósfera de nitrógeno desde 20°C a 600°C.

Muestra	Etapas	Rango de temperatura (°C)	Temperatura máxima del pico (°C)	Pérdida de peso al final de la etapa (%)	Residuos a 600°C (%)
GM	1	20 - 200	50	3	18
	2	200 - 400	323	54	
	3	400 - 600	488	25	
GA	1	20 - 200	52	5	22
	2	200 - 400	319	49	
	3	400 - 600	479	24	

Tensión Superficial de las Soluciones de Agua/Goma de Mezquite (*Prosopis spp*) y de Goma Arábiga (*Acacia spp*)

Las capacidades de adsorción interfacial de la GA se conocen ampliamente, por lo que es interesante explorar la actividad superficial de la GM. Los resultados de la tensión superficial se representan en la Figura 6. Se encontró que la tensión superficial de las soluciones de las dos gomas fue dependiente de la concentración, observándose una reducción con el aumento de la concentración (<76.3 mN/m). Cuando la concentración de la solución de GM fue mayor que 0.2 % (p/v), la reducción de la tensión superficial fue mayor que la reducción de la solución de la GA a la misma concentración. Como se muestra en la Figura 6, cuando la concentración de las soluciones fue 0.4%, la GM redujo 4.3% la tensión superficial del agua, mientras que la GA la redujo 1.0%.

Esta variabilidad se puede atribuir al contenido de proteínas, que fue 1.1% mayor en la GM. Los polisacáridos son principalmente polímeros hidrófilos, que no presentan actividad superficial significativa (Dickinson, et al., 1988). Sin embargo, algunos polisacáridos pueden

migrar lentamente a la interfase agua-aire y mostrar alguna actividad en la superficie (Garti, et al., 1999). Los estudios químicos establecen que la GM es una mezcla compleja de polisacáridos y glicoproteínas; la mayoría de ellos están entrecruzados formando proteínas de arabinogalactano (PAG). La GM se clasificó como una PAG de alto peso molecular, que es ligeramente ácida, heterogénea y polidispersa (López-Franco et al., 2012). La GA, también es un polisacárido complejo con una pequeña cantidad de proteína integrada en el polisacárido altamente ramificado que consiste en galactosa, arabinosa, ramnosa y ácido glucurónico (Williams y Phillips, 2000).

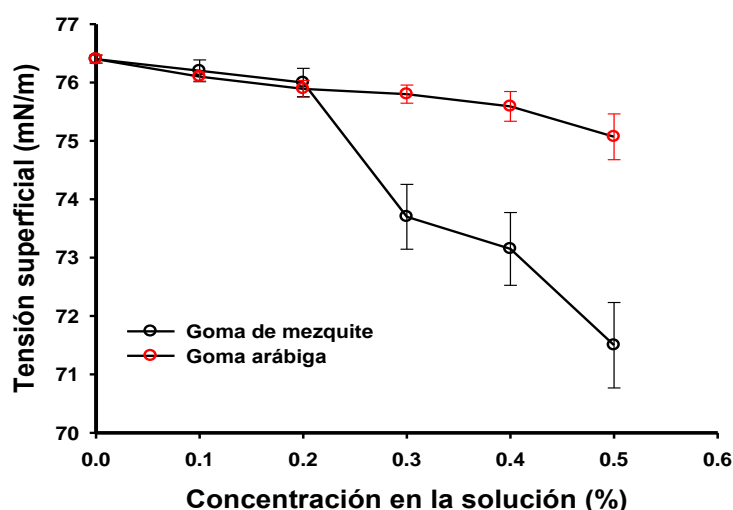


Figura 6. Tensión superficial de la GM y de la GA a distintas concentraciones

Propiedades para Emulsionar la Grasa Butírica por la Solución Agua/Goma de Mezquite (*Prosopis spp*) y Goma Arábica (*Acacia spp*)

En la preparación de emulsiones, la energía mecánica se utiliza para separar la grasa en pequeñas gotas. La adsorción de moléculas anfifílicas (extremo hidrofílico e hidrofóbico) en la interfase aceite-en-agua crea una membrana que reduce la energía interfacial y evita la coalescencia (unión de las partículas) de las gotitas. La AE refleja la capacidad de la goma para formar emulsiones de aceite-en-agua, y debido a que la densidad óptica (DO) es correlativa al número de gotitas por unidad de volumen y al radio de las gotitas (Garti, et al. 1999), la AE se determinó a partir de la absorbancia medida inmediatamente después de formada la emulsión.

En la Figura 7 se observa que para las dos gomas, la AE ($t = 0$ min) es mayor a una concentración de 0.4% en peso de la goma, y que a 0.2% la GM presentó mayor turbidez que la GA. Esto puede indicar que inmediatamente después de preparada la emulsión, la GM a 0.2 y 0.4%, coadyuvó más en aumento del número de gotitas por unidad de volumen de la grasa butírica que la GA, es decir, presentó mayor actividad emulsionante.

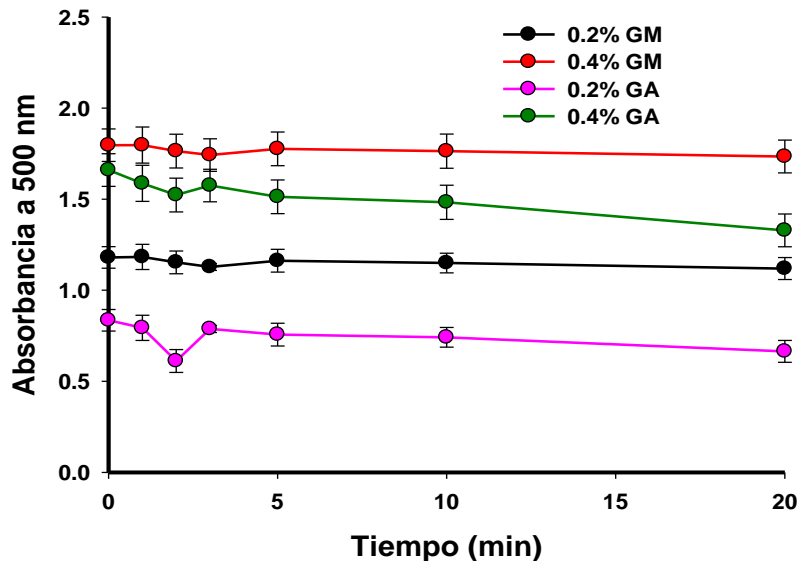


Figura 7. Actividad emulsionante de la solución agua/goma de mezquite (*Prosopis* spp) y goma arábiga (*Acacia* spp) con grasa butírica fundida a $37^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$

Durante la formación de la emulsión, la reducción del tamaño de las gotas de aceite, se explica en términos de la eficiencia del corte o en términos de la velocidad de la migración de la goma hacia las gotas de aceite durante la cizalla y el rompimiento de las gotas (McClements, 2000). Durante el ensayo, la cizalla fue la misma en todas las muestras, ya que la homogeneización se realizó a 2,000 rpm, por lo que se puede decir, que en el sistema agua/goma/grasa butírica, se facilitó más el movimiento hidrodinámico de la GM hacia las gotas de grasa, que a la GA. En otros estudios se ha demostrado que el componente proteína arabinogalactano de la GA es el responsable de sus propiedades emulsionantes, específicamente a la actividad de interface de los residuos de azúcares hidrófilos (D-galactosa y L-arabinosa) y de aminoácidos hidrófobos (hidroxiprolina) (Al-Assaf et al. 2007). Esto significa

que probablemente la GM contiene una proporción más adecuada de residuos de azúcares hidrófilos y de aminoácidos hidrófobos.

La Figura 7 muestra también que la estabilidad de la emulsión de las muestras durante los primeros minutos de reposo a temperatura de $37^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$, mostró fluctuaciones que fueron más marcadas con la GA. Pasados 5 minutos, la estabilidad se mantuvo casi constante, pero con la GM la estabilidad de la emulsión fue mejor que las muestras con la GA. La GA se considera un buen estabilizador de sistemas de emulsión de aceite-en-agua (Yadav et al., 2007) debido a la afinidad hidrófila aportada por sus fracciones de polisacáridos y la afinidad hidrófoba aportado por sus fracciones de proteína. Sin embargo, en este estudio se observó que la emulsión con la GM permaneció estable durante 20 minutos, y que la GA mostró un decaimiento después de 10 minutos de reposo, que fue más evidente a la concentración de 0.4%. Las emulsiones no son termodinámicamente estables, y una emulsión inestable es muy susceptible a la separación de las fases de aceite y agua, por lo que, el cambio en la DO con el tiempo refleja la estabilidad de la emulsión a la coalescencia (Hernandez et al., 1991), esto es, que cambia el tamaño y el número de la gotitas de grasa.

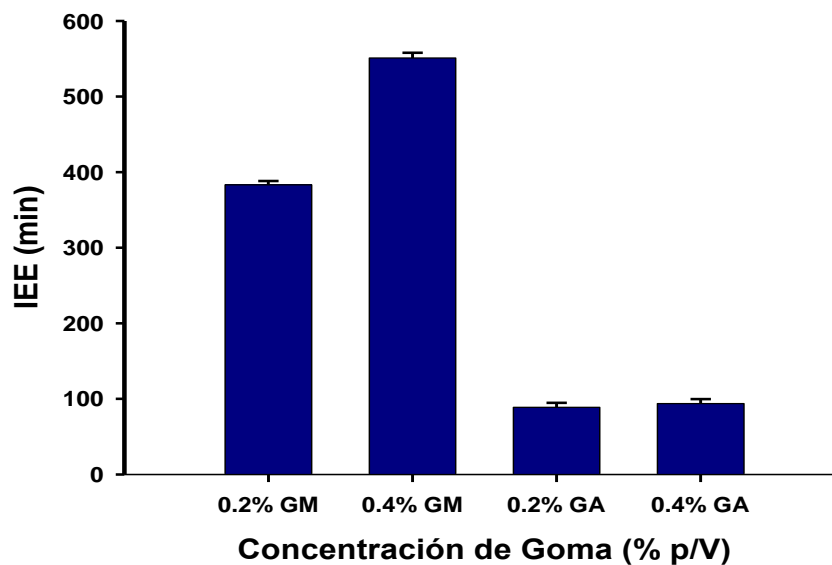


Figura 8. IEE con grasa butírica, como una función del tipo y la concentración de la GM y de la GA

En la figura 8 se observa que la vida media de la disminución de la turbidez de la emulsión fue mayor con GM y que esa estabilidad aumentó con 0.4% de concentración. Esto

significa que el aumento de la concentración de la goma puede mejorar la cobertura de la superficie de las gotitas de grasa butírica con la cadena poli-péptida hidrófoba, y que los grupos hidrófilos de arabinogalactano se extienden en la fase acuosa y evitan la agregación de las gotas por medio de repulsión estérica y electroestática, promoviendo la estabilidad (Bouyer, et al., 2012). En esta propiedad la GM fue superior a la GA. Químicamente, la GM tuvo 1.1% veces más proteína que la GA (Tabla 7), que se sabe son mezclas complejas de distintas fracciones con diferentes estructuras químicas. También informaron que hay diferencias entre la proporción de los residuos de los carbohidratos L-arabinosa, D-galactosa, 4-O-metil-D-glucuronato, y L-ramnosa, siendo de 4: 2: 1: 1 para la GM, y de 2: 4: 1: 1 para la GA, respectivamente. Estas diferencias pudieran ser la causa de que la emulsión de la grasa butírica/agua/goma fuera más estable para la GM (Goycoolea, et al 1998; Orozco-Villafuerte, et al., 2003).

El aumento de la concentración de las gomas puede conducir a una mejor cobertura en las superficies de las gotitas y promover la estabilidad a largo plazo de las emulsiones mediante la formación de una capa protectora gruesa alrededor de las gotitas de aceite (Bouyer, et al., 2012).

Características Viscosimétricas de la Solución Agua/Goma

Las curvas de flujo de la solución agua/GM y GA en las dos concentraciones evaluadas (0.2% y 0.4%) se muestran en la Figura 9. Cada una de las curvas mostró una fluidización por la cizalla a velocidades de corte bajas ($<2 \text{ s}^{-1}$) y una meseta (comportamiento newtoniano) a velocidades más altas ($>10 \text{ s}^{-1}$). La solución de GM con 0.2% presentó la mayor fluidización por cizalla. Este comportamiento reo-fluidificante (o fluidización) se interpreta como una consecuencia del rompimiento progresivo de los agregados (interacción macromolécula-macromolécula) en combinación con la alineación de las moléculas de la goma en la zona de cizallamiento (Li et al, 2009). La viscosidad (η , en mPa·s) para la solución de GM a una velocidad de cizallamiento de 100 s^{-1} , fue de 13.18 y 15.85 a la concentración de 0.2 y 0.4%, respectivamente. En las soluciones de GA se observó una viscosidad de 15.85 y 16.22 mPa·s a 0.2 y 0.4% de concentración, respectivamente.

Para entender mejor la influencia de la concentración de la GM y de la GA sobre las propiedades de flujo de las soluciones diluidas. A los datos experimentales de velocidad de

corte ($\dot{\gamma}$) versus esfuerzo de corte (τ), se le aplicaron el modelo de la ley de potencia ($\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$), y se linializaron aplicando logaritmo a cada uno de los lados de la ecuación ($\log \tau = \log k + n \log \dot{\gamma}$), y los resultados se muestran en la Figura 10. Para obtener valores estadísticamente mejores de k y n se aplicó una regresión lineal, donde el intercepto es $\log k$ y la pendiente es n (Figura 10). Los índices de flujo de cada solución indicaron un comportamiento reo-fluidificante, con valores $n < 1$, pero muy cercanos al comportamiento newtoniano ($n = 1$). Esta fluidización se observa en la Figura 10 a velocidades de cizalla entre 4 s^{-1} y 8 s^{-1} , en las soluciones de GM (Figura 10 (a)) y entre 1 s^{-1} y 10 s^{-1} , en las soluciones de GA (Figura 10 (b)). En todos los casos (Figura 10), a valores de velocidades de cizalla mayores que 8 s^{-1} y 10 s^{-1} , la pendiente aumentó con el aumento de la velocidad de cizalla, lo que indica un comportamiento newtoniano. Los valores del parámetro n disminuyeron con el aumento de la concentración de la goma y la disminución fue mayor en las soluciones con GM, con valores de 0.97 y 0.93 a concentraciones de 0.2% y 0.4%, respectivamente (Figura 10 (a)). En general, la reo-fluidización aumentó con el aumento de la concentración de la goma.

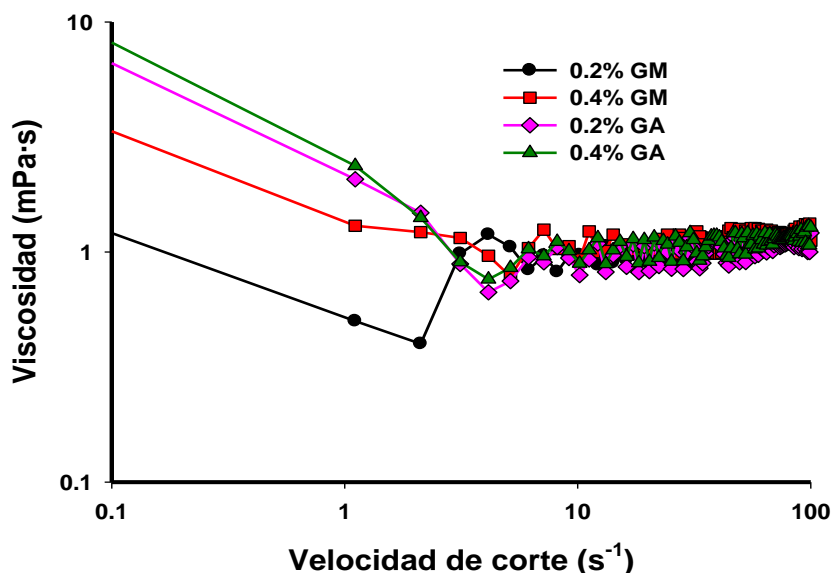


Figura 9. Viscosidad de las soluciones de GM y de GA como una función del aumento de la velocidad de corte, medida a concentraciones de 0.2 y 0.4% (p/V)

Este comportamiento reo-fluidificante de soluciones de GA se ha observado en otros estudios (Li, et al., 2009; Goycoolea, et al., 1995). Las explicaciones se basan en el equilibrio

entre las asociaciones de las macromoléculas al aplicarse la cizalla. El grado de ramificación (GR) del polímero y el impedimento estérico rigen la capacidad de formar entrecruzamientos. La mayor parte de la estructura de los polisacáridos de la GA es altamente ramificada, y se ha observado que la molécula completa en solución tiene una forma alargada tipo gusano (Ikeda et al., 2005). Cuando se disuelve, las moléculas forman agregados de partículas y cuando se aplica cizalla los agregados se disocian en entidades más pequeñas. Por lo tanto, Li, et al., (2009) proponen que en el proceso de cizalla de baja a alta velocidad de cizallamiento ocurre la disociación de los agregados y de este modo la viscosidad disminuye de forma sincrónica con la disociación. A velocidades de cizallamiento más altas que la velocidad de cizallamiento crítica, se establece el equilibrio final de la asociación por cizallamiento intenso, por lo tanto, presenta un comportamiento newtoniano.

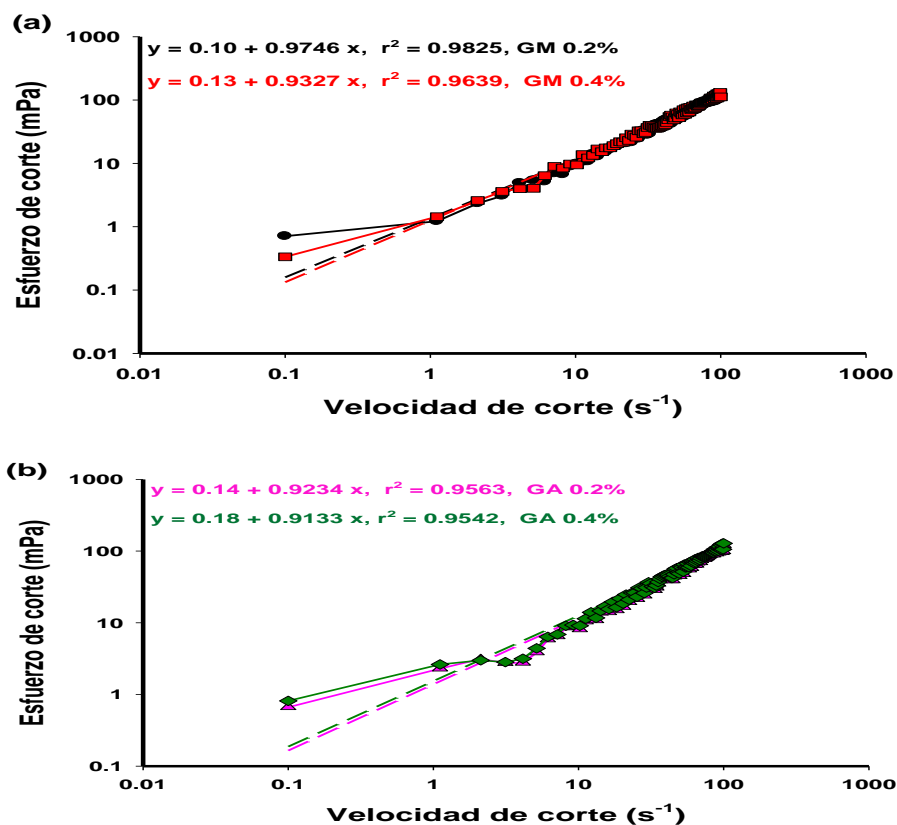


Figura 10. Curvas del log de la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) versus el log del esfuerzo de corte (τ) de la solución agua/GM (a) y agua/GA (b)

En las soluciones diluidas agua/goma, se puede decir que la velocidad de cizallamiento crítica es 8 s^{-1} y 10 s^{-1} , para la GM y la GA, respectivamente. Que el rango de fluidización de las

soluciones de GM sea menor que las soluciones de GA, puede deberse a que la estructura de la GM sea menos ramificada, lo que coincide con lo observado en la Tabla 8, que la GM es más termoestable debido a que en su estructura hay menos ramificaciones.

Determinación del Efecto de la Adición de la Goma de Mezquite (*Prosopis spp*) y Goma Arábiga (*Acacia spp*) en las Propiedades de la Congelación y la Descongelación de la Solución Agua/Goma

Establecimiento de la Curva de Congelación de las Soluciones de Goma de Mezquite (*Prosopis spp*) y Goma Arábiga (*Acacia spp*)

Para determinar este efecto, primero se estableció un método para definir bien y caracterizar el perfil de la congelación de las muestras de la solución diluida agua-goma, que consistió en registrar los perfiles de temperatura-tiempo cuando las muestras se enfriaron desde 25 °C hasta -15 °C ($\Delta T = -40^{\circ}\text{C}$), en tamaños de muestra de 100 mL. Estos perfiles inician en el tiempo y a la temperatura de colocación de la muestra en el medio enfriador y se terminan a una temperatura bajo cero predeterminada. En la industria alimentaria, los alimentos se congelan a temperaturas entre -15 a -20° C (Evans, 2008).

En la Figura 11, se observan los perfiles de la congelación de las soluciones agua-goma, en los que se distinguen cuatro etapas: enfriamiento, en la que la temperatura de la muestra disminuyó rápidamente desde 25°C hasta la temperatura de inicio de la siguiente etapa, conocida como sub-enfriamiento. En esta segunda etapa, que se asocia con la energía de activación necesaria para que inicie la nucleación (Goff, 1994), la temperatura de la solución disminuyó y después aumentó, hasta la temperatura del cambio de fase, con la que se inicia la tercera etapa. En esta etapa, la temperatura permaneció relativamente constante durante un tiempo, conocido como el tiempo del congelamiento efectivo (Wiktor, et al 2015). Una vez que todos los cristales de hielo se formaron, la temperatura se redujo debido a un enfriamiento adicional de la muestra completamente congelada (cuarta etapa). La etapa tres, en la que ocurre la transición de fase, es la más importante, porque determina la calidad y el costo de producción de los alimentos congelados (Wiktor, et al 2015).

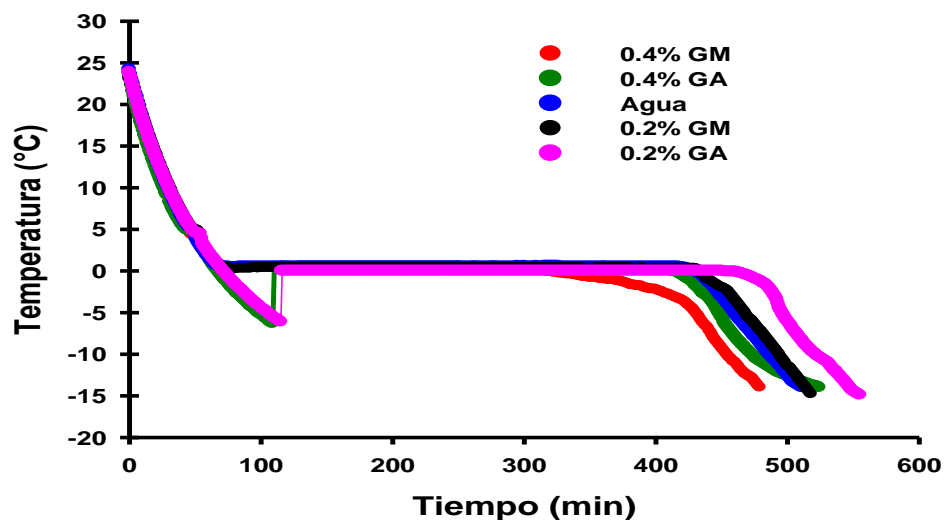


Figura 11. Curvas de congelación de las soluciones de GM y de GA a concentraciones de 0.2% y 0.4%

Características del Congelamiento

La Tabla 9 muestra el tiempo de las etapas de congelación para distinguir el efecto de la concentración y del tipo de goma.

Tabla 9. Tiempo de congelación de las soluciones de GM y de GA en sus diferentes etapas.

Muestra	Tiempo (min)					Velocidad media del enfriamiento total (°C/h)
	E	Sub-E	C	EA	TT	
Agua	76 ± 1 ^a	6 ± 1 ^c	346 ± 1 ^a	82 ± 1 ^c	500 ± 1 ^c	- 4.7
Agua/ 0.2% GM	75 ± 1 ^a	19 ± 2 ^b	339 ± 2 ^b	85 ± 1 ^c	518 ± 2 ^c	- 4.6
Agua/ 0.2% GA	71 ± 1 ^{ab}	45 ± 2 ^a	345 ± 1 ^a	94 ± 2 ^{bc}	555 ± 2 ^a	- 4.3
Agua/ 0.4% GM	71 ± 1 ^{ab}	12 ± 1 ^{bc}	225 ± 1 ^d	171 ± 1 ^a	479 ± 1 ^d	- 5.0
Agua/ 0.4% GA	67 ± 1 ^b	42 ± 2 ^a	315 ± 1 ^c	101 ± 2 ^b	525 ± 2 ^b	- 4.6

E, enfriamiento; Sub-E, sub-enfriamiento; C, congelamiento; EA, enfriamiento adicional; TT, tiempo total (= suma de E + Sub-E + C + EA). Valores promedio \pm desviación estándar en cada columna con la misma letra de superíndice no difieren significativamente ($P > 0.05$, $n=3$).

La concentración y el tipo de goma tuvieron una influencia muy marcada en el tiempo de cada etapa del enfriamiento (Tabla 9). El tiempo de congelamiento (C) más largo se observó en el agua sin goma y en la solución con 0.2% de GA, y fue igual a 346 y 345 min, respectivamente. Con 0.4% de GM, el tiempo de C se redujo 121 minutos en comparación con el del agua. Esto significa que la GM con esa concentración, redujo el tiempo de transición de fase en un 35% en comparación con el agua. Esto pudo deberse a que la goma disminuyó la cantidad de agua congelable. Sin embargo, en esta solución agua/0.4% GM, se observó que el tiempo necesario para la formación de cristales nuevos (Sub-E) fue significativamente igual a la del agua pura y a la de la solución agua/0.2% GM.

La GA causó que el tiempo de Sub-E fuera significativamente más largo, pero sin diferencias entre las dos concentraciones, observándose 45 y 42 min con 0.2% y 0.4%, respectivamente. Este alargamiento del proceso de reducción de la temperatura de la solución agua/GA por debajo de su punto de congelación sin solidificación, pudiera afectar la morfología, el tamaño y la distribución de los cristales de hielo (Petzold y Aguilera, 2009). Estas características son importantes en las propiedades sensoriales de los alimentos que se consumen en estado congelado.

El tiempo de E más largo para obtener la temperatura de -15°C (EA) se observó en la muestra agua/0.4% GM y fue igual a 171 min, y el más corto en el agua sin goma, que necesito 82 min. La concentración de 0.2% de las dos gomas, influyó en el EA, pero el cambio no fue estadísticamente diferente. El TT más corto se observó en la solución agua/0.4% GM, lo que ocasionó que la velocidad media del enfriamiento total fuera mayor.

La velocidad de congelación es una función de dos variables principales: (1) la diferencia de temperatura (ΔT) entre el producto y el medio de enfriamiento; y, (2) las resistencias a la transferencia del calor (Degner et al., 2014). Este experimento se mantuvo reproducible de la siguiente manera: la geometría de las muestras se controló al contener cada una, en vasos de precipitados del mismo material y capacidad, ocupando un volumen de 100 ml y colocando el

termopar en el centro geométrico. También, la temperatura inicial ($25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) y la del medio enfriador ($-18^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) se mantuvieron constantes, por lo que la alteración de la resistencia térmica fue producida por el tipo y la concentración de la goma.

Uno de los fenómenos físico-químicos más importantes que ocurren durante la congelación de soluciones acuosas es la concentración por congelación (Cook y Hartel, 2010). Cuando se forman los cristales de hielo la concentración del soluto presente en la fase acuosa no congelada también aumenta. Como resultado, la temperatura de congelación de la fase acuosa no congelada disminuye y aumenta su viscosidad, lo que ralentiza más los procesos de nucleación y cristalización. La GM con 0.4% de concentración tuvo una marcada influencia en la disminución de la velocidad media del enfriamiento total, que resultó por el acortamiento del tiempo del cambio de fase, es decir, que aceleró la velocidad de cristalización del agua. La GA, tuvo una marcada influencia sobre numerosos aspectos de la congelación de la solución, incluyendo el tiempo de Sub-E, la temperatura (-6.1 a -6.3°C), el tiempo de nucleación del hielo, y la velocidad de congelación (Figura 8). Por lo que, los resultados anteriores indican que la relación entre el tiempo de cada etapa del proceso y las condiciones del tratamiento debe ser considerada como una dependencia compleja.

Establecimiento de la Curva de Descongelación de la Solución Agua/Goma

El método para definir y caracterizar el perfil de la descongelación de las muestras de la solución diluida agua-goma, consistió en registrar los perfiles temperatura-tiempo cuando las muestras se calentaron desde $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 55^\circ\text{C}$), en tamaños de muestra de 100 mL. Estos perfiles inician en el tiempo y a la temperatura de colocación de la muestra en el medio calentador y se terminan a una temperatura predeterminada.

En la Figura 12, se distinguen las siguientes etapas de la descongelación: precalentamiento (Pre-C), transición de fase (DesC) y calentamiento (C), que se determinan como el tiempo necesario para que la muestra cambie la temperatura de -15°C a -0.8°C , de -0.8°C a 0°C , y de 0°C hasta 40°C , respectivamente.

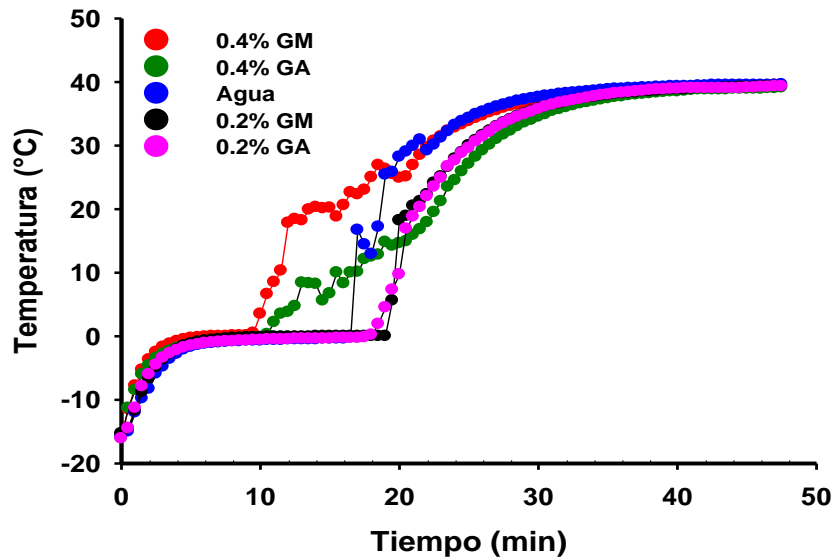


Figura 12. Curvas de descongelación de las soluciones de GM y de GA a concentraciones de 0.2% y 0.4%

En la Figura 12, se observan los perfiles de la descongelación de las soluciones agua-goma, en los que se distinguen las tres etapas mencionadas anteriormente: Pre-C, en la que la temperatura de la muestra aumentó rápidamente desde -15°C hasta la temperatura de inicio de la siguiente etapa, conocida como transición de fase, que se asocia con la energía de activación necesaria para que inicie la fusión o cambio de fase. La principal diferencia entre la congelación y la descongelación es que el calor extraído al alimento durante la congelación, debe atravesar una zona ya congelada mientras que al descongelar el flujo de calor se transfiere a través del alimento descongelado, de menor conductividad térmica. Por lo tanto, frente a igual fuerza impulsora, el tiempo de descongelación será mayor que el de congelación (Salvadori, 1994). Análogamente a la congelación, se observa que todas las curvas tienen la misma forma, en todas se presenta una zona de rápido aumento de la temperatura del centro luego que se produce la mayor parte del cambio de fase, en la región final de descongelación.

Características de la Descongelación

En la Tabla 10 se muestra el tiempo de las etapas de descongelación para distinguir el efecto de la concentración y del tipo de goma.

Tabla 10. Tiempo de la descongelación de las soluciones de GM y de GA en sus diferentes etapas.

Muestra	Tiempo (min)				Velocidad media del calentamiento total (°C/min)
	Pre-C	DesC	C	TT	
Agua	8.0 ± 1 ^a	8.5 ± 1 ^b	42.0 ± 1 ^c	58.5 ± 1 ^b	0.94
Agua/ 0.2% GM	6.0 ± 1 ^b	13.0 ± 2 ^a	28.5 ± 2 ^d	47.5 ± 1 ^c	1.15
Agua/ 0.2% GA	7.5 ± 1 ^a	10.5 ± 2 ^b	47.5 ± 1 ^b	65.5 ± 2 ^a	0.83
Agua/ 0.4% GM	4.0 ± 1 ^c	3.5 ± 1 ^c	40.0 ± 1 ^c	47.5 ± 1 ^c	1.15
Agua/ 0.4% GA	7.5 ± 1 ^a	3.0 ± 2 ^c	55.0 ± 1 ^a	65.5 ± 2 ^a	0.83

Pre-C, precalentamiento; DesC, descongelación; C, calentamiento; TT, tiempo total (= suma de Pre-C + DesC + C). Valores promedio ± desviación estándar en cada columna con la misma letra de superíndice no difieren significativamente ($P > 0.05$, $n=3$).

El punto de fusión se define a veces como el punto de equilibrio de la descongelación, que es la temperatura a la que se observa la velocidad más lenta de cambio de la temperatura durante la descongelación (Rahman et al., 2002). El punto de fusión y el punto de congelación están entrelazados e interrelacionados. Rahman et al. (2002) informaron de que el punto de fusión se puede interpretar directamente como el punto de congelación.

Determinación del Efecto de la Adición de Goma de Mezquite (*Prosopis spp*) y de Goma Arábica (*Acacia spp*), en las Propiedades de la Congelación y la Descongelación de la Mezcla Agua/Formula Láctea/Goma

Establecimiento de la Curva de Congelación de la Mezcla Agua/Formula Láctea/Goma de Mezquite (*Prosopis spp*) y Goma Arábica (*Acacia spp*)

Primero, se estableció un método para definir bien y caracterizar el perfil de la congelación de las muestras de la mezcla agua/goma/fórmula láctea, que consistió en registrar los perfiles temperatura-tiempo cuando las muestras se enfriaron desde 25 °C hasta -15 °C ($\Delta T = -40^\circ\text{C}$), en tamaños de muestra de 100 mL. Estos perfiles inician en el tiempo y a la temperatura de

colocación de la muestra en el medio enfriador y se terminan a una temperatura bajo cero predeterminada.

En la Figura 13, se observan los perfiles de la congelación de la mezcla agua/goma/fórmula láctea, en los que se distinguen, al igual que con la solución agua/goma, cuatro etapas: E, en la que la temperatura de la muestra disminuyó rápidamente desde 25 °C hasta la temperatura de inicio de la siguiente etapa, conocida como Sub-E. En esta segunda etapa, la temperatura de la solución disminuyó y después aumentó, hasta la temperatura del cambio de fase, con la que se inicia la tercera etapa (C). En esta etapa, la temperatura permaneció relativamente constante durante un tiempo. Una vez que todos los cristales de hielo se formaron, la temperatura se redujo debido a un EA de la muestra completamente congelada (cuarta etapa).

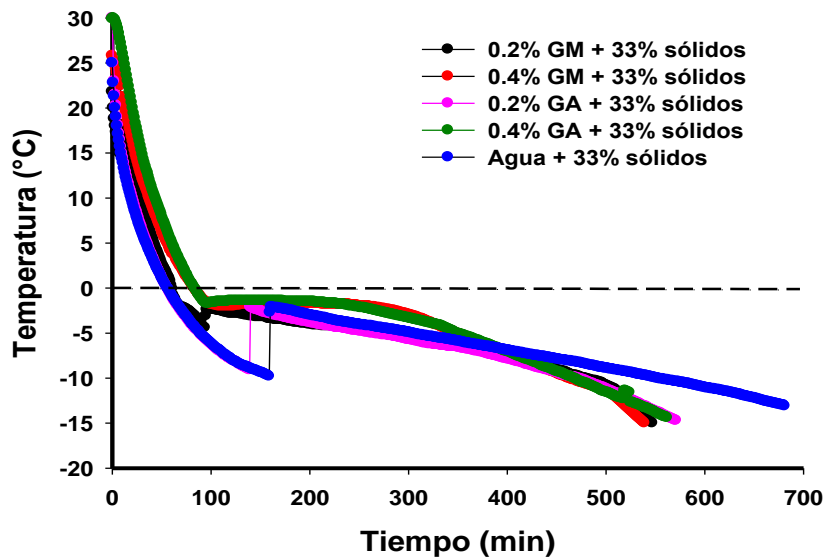


Figura 13. Curvas de congelación de las mezclas agua/fórmula láctea/GM y de GA, con concentraciones de 33% de fórmula láctea

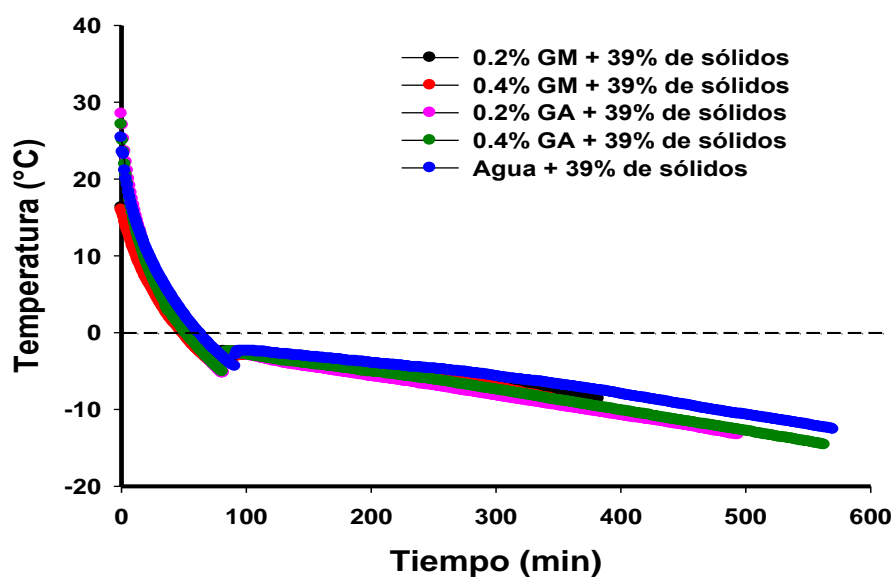


Figura 14. Curvas de congelación de las mezclas agua/fórmula láctea/GM y de GA, con concentraciones de 39% de fórmula láctea

Características del Congelamiento

La Tabla 11 muestra el tiempo de las etapas de congelación para distinguir el efecto de la concentración y del tipo de goma, en una formulación láctea para helado.

Tabla 11. Tiempo de la congelación de las mezclas agua/fórmula láctea/GM y de GA en sus diferentes etapas.

Tratamiento	Tiempo (min)					Velocidad media del enfriamiento total (°C/h)
	E	Sub-E	C	EA	TT	
33% fórmula láctea						
Agua	68 ± 1 ^c	95 ± 2 ^a	6 ± 1 ^c	513 ± 1 ^a	682 ± 1 ^a	- 3.52 ± 0.3 ^c
GM 0.2%	77 ± 1 ^b	19 ± 2 ^e	10 ± 2 ^b	491 ± 1 ^a	597 ± 2 ^b	- 4.02 ± 0.1 ^b
GA 0.2%	69 ± 1 ^c	72 ± 2 ^b	2 ± 1 ^d	429 ± 2 ^b	572 ± 2 ^b	- 4.20 ± 0.3 ^b
GM 0.4%	97 ± 1 ^a	61 ± 2 ^c	18 ± 1 ^a	399 ± 1 ^c	575 ± 1 ^b	- 4.17 ± 0.4 ^b
GA 0.4%	93 ± 1 ^a	25 ± 1 ^d	16 ± 1 ^a	389 ± 1 ^c	523 ± 1 ^b	-4.74 ± 0.2 ^a

39% de fórmula láctea

Agua	76 ± 1 ^a	17 ± 2 ^c	14 ± 1 ^c	463 ± 1 ^a	570 ± 1 ^a	-4.00 ± 0.2 ^b
GM 0.2%	65 ± 1 ^b	11 ± 1 ^d	20 ± 1 ^b	466 ± 2 ^a	562 ± 1 ^a	-3.28 ± 0.1 ^c
GA 0.2%	66 ± 1 ^b	20 ± 1 ^b	6 ± 1 ^d	403 ± 1 ^b	495 ± 1 ^b	-4.97 ± 0.2 ^a
GM 0.4%	67 ± 1 ^b	27 ± 2 ^a	28 ± 1 ^a	371 ± 2 ^c	493 ± 2 ^b	-3.76 ± 0.3 ^c
GA 0.4%	66 ± 1 ^b	18 ± 1 ^c	7 ± 1 ^d	473 ± 1 ^a	564 ± 1 ^a	-4.36 ± 0.1 ^b

E, enfriamiento; Sub-E, sub-enfriamiento; C, congelamiento; EA, enfriamiento adicional; TT, tiempo total (= suma de E + Sub-E + C + EA). Valores promedio ± desviación estándar en cada columna con la misma letra de superíndice no difieren significativamente ($P > 0.05$, $n=3$). Las diferencias de las medias se determinaron separadas para cada concentración de sólidos lácteos.

El tiempo de Sub-E, es el tiempo en el que el agua permanece en estado líquido, aunque la temperatura esté por debajo del punto de congelación, e incluye el tiempo en que la temperatura aumenta en forma rápida hasta el punto de congelación, cuando empiezan a formarse los cristales de hielo y se libera el calor latente de cristalización. Se observó un efecto del tipo de goma y de la concentración de goma. En la mezcla con 33% de fórmula láctea, las dos gomas a las dos concentraciones acortaron el tiempo Sub-E al compararlo con el de la mezcla agua/fórmula láctea. Sin embargo, el efecto del tipo de goma fue evidente, ya que con 0.4%, el tiempo de Sub-E se alargó con GM y se acortó con la GA. Los efectos contrarios se observaron con 0.2%. Al usar 39% de fórmula láctea, el Sub-E se alargó más tiempo con las gomas que sin ellas, excepto con 0.2% GM. Esta etapa fue altamente dependiente de la formulación de la mezcla.

El Sub-E se define como la etapa previa de formación de núcleos de cristales de hielo, que alcanza temperaturas por debajo de la temperatura inicial de congelación, en la que las moléculas de agua forman agregados similares al hielo, sin cambiar de fase, que permanecen inestables hasta que exceden un tamaño crítico que les permite superar la energía interfacial desfavorable (Wang et al., 2015), que es cuando se da el aumento súbito de la temperatura, al valor del punto de congelación o cambio de fase. En este contexto, se puede decir que la GM se comportó como un promotor de la nucleación, al acortar el tiempo de la etapa de Sub-E de las mezclas con fórmula láctea, lo que pudiera ocasionar un acortamiento del tiempo de congelación, y como consecuencia, favorecer la formación de cristales de hielo más pequeños.

La temperatura de Sub-E más baja se observó en las soluciones agua/GA, -6.3 ± 0.028 °C y -6.1 ± 0.025 °C, para 0.4% y 0.2%, respectivamente. Con la GM, esta temperatura, también fue más baja que la del agua (0.4 ± 0.03 °C), pero sin diferencias significativas ($P > 0.05$) entre las concentraciones (0.3 ± 0.03 °C) (Figura 15). Estas observaciones indican que las gomas obstaculizaron la nucleación heterogénea, un tipo de nucleación que se da con algunos solutos como la sacarosa (Wang et al., 2015). La GA retrasó más el proceso de nucleación de las soluciones agua/goma.

El tiempo de C, es la etapa de congelación que refleja el tiempo durante el cual se produce el crecimiento de los cristales de hielo (Goff y Hartel, 2013). Durante esta etapa la temperatura se mantiene casi constante, debido al calor liberado cuando las moléculas cambian su organización de líquido a estructura cristalina, es decir, el calor latente de cristalización. En la mezcla con 33% de fórmula láctea la congelación fue más rápida con 0.2% de GA, incluso que la mezcla sin goma, sin embargo, fue la más lenta con 0.4%. Con 0.2% de GM, la congelación fue más rápida, por lo que se cumplió lo observado en el Sub-E, es decir, fue un promotor de la nucleación y acortó el congelamiento. En la mezcla con 39% de fórmula láctea, el efecto se debió a la concentración y al tipo de goma. Al agregar GM el tiempo se alargó y con la GA el tiempo se acortó. Sin embargo, la concentración de GA no tuvo efecto significativo ($P > 0.05$), mientras que a mayor concentración de GM la congelación fue más lenta. En este caso, se pudiera decir que la GM promocionó la saturación de núcleos en el Sub-E y causó una disminución de la velocidad de eliminación del calor latente, alargando la etapa de congelamiento. Éste comportamiento se favoreció con la concentración más alta.

Con la formulación láctea, la temperatura de Sub-E más baja fue en la mezcla agua/33% de fórmula láctea (-9.8 °C), y al agregar 0.2% de goma la temperatura subió a -9.2 °C y -4.4 °C con GA y GM, respectivamente (Figura 12). En cambio, con 0.4% de GM la temperatura subió a -2 °C y a -1.7 °C con GA. Para las mezclas con 39% de fórmula láctea, la mezcla sin goma alcanzó -4.4 °C, y bajó a -5.3 °C y -5.1 °C cuando se agregó 0.2% y 0.4% de GA, respectivamente. La GM subió la temperatura a -3.7 °C y a -3.5 °C con 0.4% y 0.2%, respectivamente. Una mayor temperatura de Sub-E, indica que la nucleación iniciará antes (Wang et al., 2015), por lo que se puede decir que la GM aceleró la nucleación de la mezcla agua/39% de fórmula láctea.

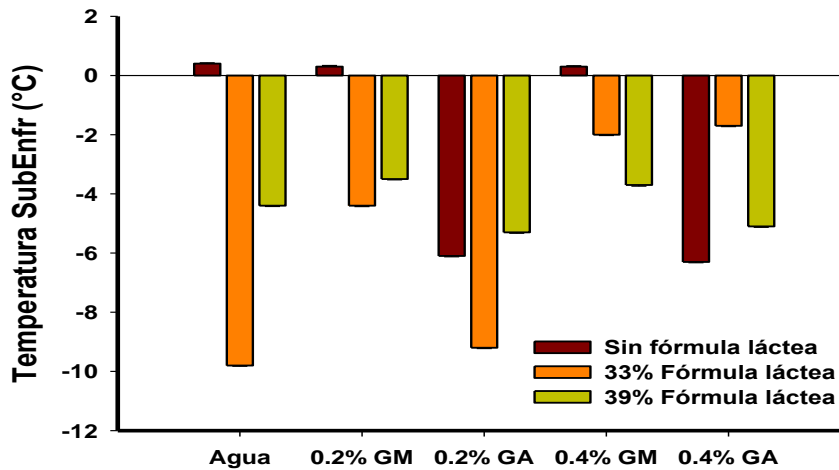


Figura 15. Efecto de la concentración y tipo de goma (GM y GA) en la temperatura de Sub-E de la solución agua/goma y de la mezcla agua/fórmula láctea/goma

Establecimiento de la Curva de Descongelación de la Mezcla Agua/Fórmula Láctea/Goma de Mezquite (*Prosopis spp*) y Goma Arábiga (*Acacia spp*)

El método para definir y caracterizar el perfil de la descongelación de las mezclas de agua/fórmula láctea/goma, consistió de la misma forma que la solución diluida de agua/goma, en registrar los perfiles temperatura-tiempo cuando las muestras se calentaron desde $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 55^{\circ}\text{C}$), en tamaños de muestra de 100 mL. En las Figuras 13 y 14 se muestran los perfiles de la descongelación de las mezclas con 33% y 39% de fórmula láctea, respectivamente. Inician en el tiempo (0 min) y a la temperatura de colocación (-15°C) de la muestra en el medio calentador (40°C) y se terminan a una temperatura predeterminada (40°C).

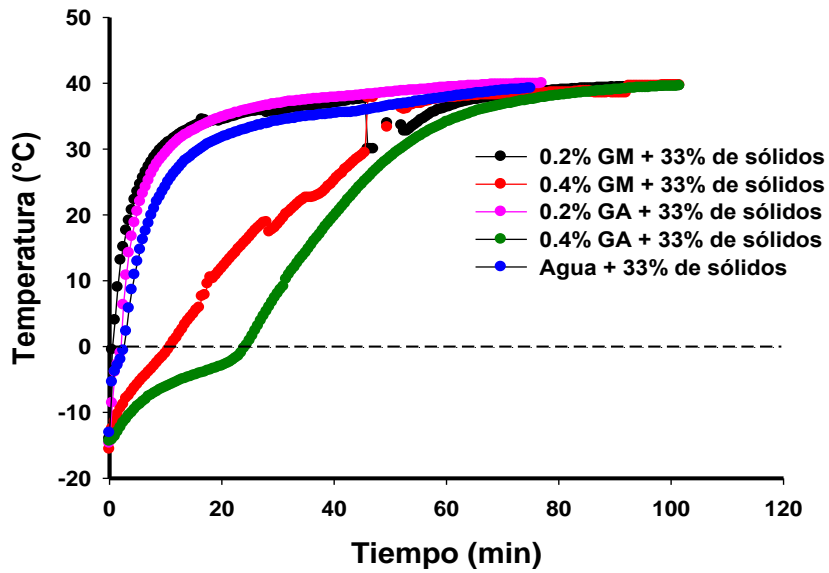


Figura 16. Curvas de descongelación de las mezclas agua/fórmula láctea/GM y de GA, con concentraciones de 33% de fórmula láctea

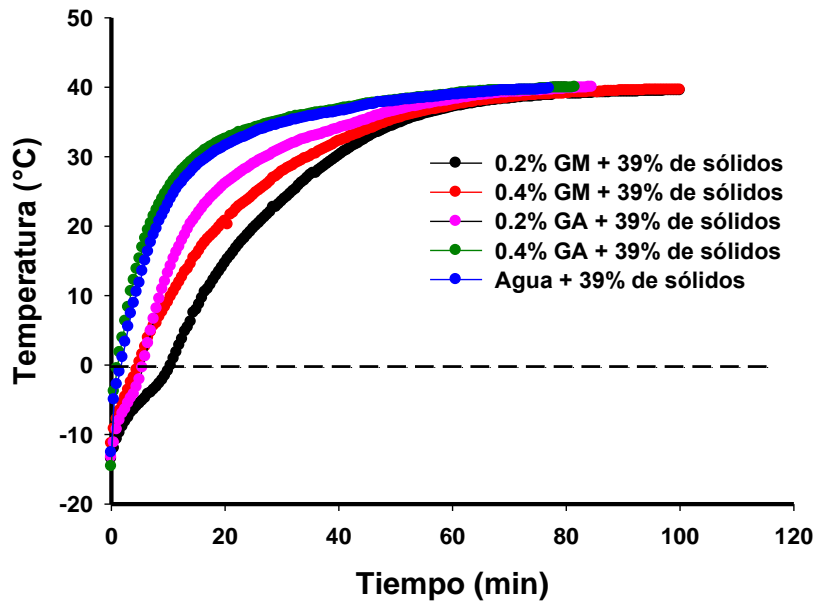


Figura 17. Curvas de descongelación de las mezclas agua/fórmula láctea/GM y de GA, con concentraciones de 39% de fórmula láctea

Las curvas de descongelación con 33% de fórmula láctea con 0.4% de goma fueron diferentes en comparación con las muestras con 0.2% de goma y sin goma (Figura 16). Después de 20 minutos, la temperatura en el centro geométrico de la muestra fue mayor a 34 °C y 31°C para las mezclas con 0.2% de goma y sin goma, respectivamente; y mayor que 11°C en la mezcla con 0.4% de GM y de -3°C con 0.4% de GA.

Con 39% de fórmula láctea (Figura 17), la curva de la mezcla con 0.2% de GM fue diferente a las de las otras muestras. Después de 10 minutos, la temperatura del centro geométrico de la muestra fue negativa (-0.9°C), mientras que en las mezclas con 0.4% GM, 0.2 y 0.4 GA, y sin goma, la temperatura fue 9°C, mayor que 13°C, que 25°C y que 23°C, respectivamente.

Características del Descongelamiento

El tiempo de cada etapa del calentamiento se muestra en la Tabla 12. Cada mezcla agua/goma/fórmula láctea mostró un TT significativamente ($P < 0.05$) mayor que la mezcla sin goma, excepto con 0.2% GA. El tiempo de la etapa de DesC de todas las mezclas estuvo entre 0.5 ± 0.2 y 2.0 ± 0.2 minutos, excepto la mezcla con GA al 0.4%, que tardó 5 ± 0.1 minutos. Esto significa que al agregar 0.4% de GA la fusión del hielo durante el calentamiento a 40°C se retrasó entre un 60% a 90% en comparación con los otros tratamientos. Además, en la DesC, sólo con 33% de fórmula láctea, las diferencias entre los tratamientos fueron estadísticamente significativas. Sin embargo, la menor velocidad media del calentamiento total, se observó en la mezcla de 33% de fórmula láctea con 0.4% GM.

En la Tabla 12, se observa el tiempo de las etapas de descongelación para distinguir el efecto de la concentración y del tipo de goma, en la formulación láctea para helado.

Tabla 12. Tiempo de la descongelación de las mezclas agua/fórmula láctea/GM y de GA en sus diferentes etapas.

Tratamiento	Tiempo (min)				Velocidad media del calentamiento total (°C/min)
	Pre-C	DesC	C	TT	
33% de fórmula láctea					

Agua	1.5 ± 0.1 ^c	2.0 ± 0.2 ^b	72.0 ± 1.2 ^c	75.5 ± 2.1 ^d	0.73 ± 0.01 ^a
GM 0.2%	1.0 ± 0.1 ^c	0.5 ± 0.2 ^c	86.5 ± 2.3 ^b	88.0 ± 1.8 ^c	0.63 ± 0.03 ^b
GA 0.2%	1.0 ± 0.1 ^c	2.0 ± 0.2 ^b	74.5 ± 1.3 ^c	77.5 ± 1.5 ^d	0.71 ± 0.02 ^a
GM 0.4%	10.5 ± 0.2 ^b	1.0 ± 0.2 ^b	124.5 ± 1.3 ^a	136.0 ± 2.1 ^a	0.40 ± 0.04 ^d
GA 0.4%	20.5 ± 1.2 ^a	5.0 ± 0.1 ^a	76.5 ± 2.1 ^c	102.0 ± 2.5 ^b	0.54 ± 0.03 ^c
39% de fórmula láctea					
Agua	1.0 ± 0.1 ^c	1.5 ± 0.1 ^a	73.0 ± 1.2 ^c	75.5 ± 1.9 ^c	0.73 ± 0.02 ^a
GM 0.2%	10.0 ± 0.3 ^a	1.5 ± 0.2 ^a	104.0 ± 1.3 ^a	115.5 ± 1.0 ^a	0.48 ± 0.02 ^c
GA 0.2%	4.5 ± 0.2 ^b	2.0 ± 0.1 ^a	78.0 ± 1.6 ^b	84.5 ± 1.1 ^b	0.65 ± 0.01 ^b
GM 0.4%	4.5 ± 0.1 ^b	1.0 ± 0.2 ^a	106.0 ± 1.8 ^a	111.5 ± 2.2 ^a	0.49 ± 0.01 ^c
GA 0.4%	0.5 ± 0.1 ^c	1.5 ± 0.1 ^a	80.0 ± 1.6 ^b	82.0 ± 2.5 ^b	0.66 ± 0.00 ^b

Pre-C, precalentamiento; DesC, descongelación; C, calentamiento; TT, tiempo total (= suma de Pre-C + DesC + C). Valores promedio ± desviación estándar en cada columna con la misma letra de superíndice no difieren significativamente ($P < 0.05$, $n=3$). Las diferencias de las medias se determinaron separadas para cada concentración de sólidos lácteos.

Cantidad de Hielo que se Formó en la Congelación de la Solución Agua/Goma y en la Mezcla Agua/Formulación Láctea/Goma de Mezquite (*Prosopis spp*) y Goma Arábiga (*Acacia spp*)

En la Tabla 13, se muestran los valores de las fracciones de agua ligada, agua congelable, hielo y agua sin congelar para ambas gomas, en solución y con la fórmula láctea para helado, utilizando el contenido de agua y su punto de congelación (Cleland y Valentas 1997; Schwartzberg et al., 2007). Esta última, se obtuvo de la curva de congelación y el contenido de agua, de las proporciones agua/goma y agua/goma/fórmula láctea experimentadas.

Tabla 13. Cantidad de agua ligada, agua congelable, hielo y agua sin congelar de las soluciones agua/goma y de las mezclas agua/goma/fórmula láctea de la GM y de la GA, calculada con el procedimiento para un alimento a temperaturas de sub-enfriamiento*

Tratamiento	T _{ic} (°C)	X _{al} (%)	X _{ac} (%)	X _h (%)	X _{ac} - X _h (%)
Sin fórmula láctea					
GM 0.2%	0.4 ± 0.02 ^a	0.05 ± 0.00 ^a	99.75 ± 0.00 ^a	npc	—

GM 0.4%	0.5 ± 0.02 ^a	0.01 ± 0.00 ^a	99.59 ± 0.00 ^a	npc	—
GA 0.2%	0.0 ± 0.01 ^a	0.05 ± 0.00 ^a	99.75 ± 0.00 ^a	npc	—
GA 0.4%	0.5 ± 0.03 ^a	0.01 ± 0.00 ^a	99.59 ± 0.00 ^a	npc	—
Agua	0.5 ± 0.01 ^a	—	—	—	—
33% de fórmula láctea					
GM 0.2%	- 2.4 ± 0.1 ^a	8.30 ± 0.1 ^a	58.50 ± 0.1 ^a	48.19 ± 0.1 ^b	10.31 ± 0.1 ^a
GM 0.4%	-2.2 ± 0.2 ^a	8.35 ± 0.1 ^a	58.25 ± 0.1 ^a	50.79 ± 0.1 ^a	7.46 ± 0.1 ^c
GA 0.2%	-1.6 ± 0.1 ^b	8.30 ± 0.0 ^a	58.50 ± 0.1 ^a	48.90 ± 0.0 ^b	9.60 ± 0.0 ^b
GA 0.4%	-1.4 ± 0.1 ^b	8.35 ± 0.1 ^a	58.25 ± 0.0 ^a	51.50 ± 0.1 ^a	6.75 ± 0.1 ^c
Agua	-2.2 ± 0.2 ^a	8.25 ± 0.1 ^a	58.75 ± 0.1 ^a	49.11 ± 0.0 ^b	9.64 ± 0.0 ^b
39% de fórmula láctea					
GM 0.2%	-2.5 ± 0.1 ^a	9.80 ± 0.1 ^a	51.00 ± 0.1 ^a	41.73 ± 0.1 ^a	9.27 ± 0.1 ^c
GM 0.4%	-3.0 ± 0.2 ^a	9.85 ± 0.1 ^a	50.75 ± 0.1 ^a	39.97 ± 0.0 ^b	10.78 ± 0.1 ^a
GA 0.2%	-2.6 ± 0.2 ^a	9.80 ± 0.1 ^a	51.00 ± 0.0 ^a	41.41 ± 0.1 ^a	9.59 ± 0.0 ^b
GA 0.4%	-2.5 ± 0.1 ^a	9.85 ± 0.0 ^a	50.75 ± 0.1 ^a	41.52 ± 0.0 ^a	9.23 ± 0.0 ^c
Agua	-2.4 ± 0.1 ^a	9.75 ± 0.1 ^a	51.25 ± 0.1 ^a	42.24 ± 0.1 ^a	9.01 ± 0.1 ^c

T_{ic} = Temperatura de inicio de la congelación; X_{al} = fracc en peso de agua ligada; X_{ac} = fracc en peso de agua congelable; X_h = fracc en peso de hielo; $(X_{ac} - X_h)$ = fracc en peso de agua sin congelar. $T = -15^\circ\text{C}$ fue la temperatura de la solución/mezcla congelada. La T_{ic} del agua destilada sin goma fue 0.5°C (en un medio de congelación a (-18°C)). Valores promedio \pm desviación estándar en cada columna con la misma letra de superíndice no difieren significativamente ($P > 0.05$, $n=3$). Las diferencias de las medias se determinaron separadas para cada concentración de fórmula láctea.

*Cleland y Valentas 1997; Schwartzberg et al., 2007

No se observó diferencia significativa ($P > 0.05$) de la T_{ic} en la solución agua/goma por efecto del tipo y concentración de goma, ni comparándola con el agua. El mismo efecto se observó para los valores calculados de la X_{al} y de X_{ac} . Debido a estos resultados, la X_h de estas soluciones, no se pudo calcular porque los modelos matemáticos que se usaron para su cálculo, se desarrollaron considerando que la temperatura de inicio de congelación del alimento es menor que la del agua (Schwartzberg et al., 2007). Es destacable que a mayor concentración de goma, la cantidad de agua congelable es menor, por lo que es congruente con lo observado en la Tabla 9, que a mayor concentración de goma mayor velocidad de congelación. La disminución del punto de congelación fue mayor en la mezcla agua/39% de fórmula láctea. Generalmente, la adición de solutos (tales como azúcares o sales) reduce el punto de congelación de la fase acuosa y por lo tanto el tamaño del cristal de hielo (Degner, et al., 2014).

La T_{ic} en la mezcla con 33 % de fórmula láctea, fue más baja en la mezcla con GM que con GA, sin efecto significativo ($P>0.05$) de la concentración, y sin diferencias significativas con la mezcla sin goma. Con 39 % de fórmula láctea, se observó un efecto, estadísticamente no significativo, de 0.6 °C más baja en la mezcla con 0.4% GM, que en la mezcla sin goma, e incluso 0.5°C más baja que en la mezcla con 0.4% GA. Esto significa un efecto de disminución del punto de congelación por una presencia mayor de sólidos, pero también indica que hay un mayor efecto de la GM, en el inicio de la formación de los cristales de hielo.

El T_{ic} es una de las más importantes propiedades físicas de un material alimenticio debido a que comienzan a formarse los cristales de hielo y se libera el calor latente de cristalización, además, la solución acuosa está diluida (Wang y Weller, 2005). Por lo tanto, se requiere para la predicción de las propiedades termofísicas de los alimentos congelados y para el diseño de los métodos de congelación; y en la fabricación de helados, para el diseño del intercambiador de calor con superficie raspada.

A lo largo del proceso de congelación, en un alimento siempre existe una fracción de agua sin congelar que contiene sólidos solubles, cuya concentración va aumentando a medida que se avanza en su congelación (Degner, et al., 2014). Es importante determinar la cantidad de agua no congelada, ya que afecta las propiedades del producto y a la energía (entalpía) necesaria para llevar a cabo la congelación (Wolfe et al., 2002).

En la Tabla 13 se muestra la $X_{ac} - X_h$ de las mezclas agua/goma/fórmula láctea, que se obtuvo restando la X_{ac} y la X_h . Se observó un efecto significativo ($P<0.05$) del tipo y concentración de goma en comparación con la mezcla sin goma, que dependió de la concentración de la fórmula láctea. En la mezcla con 33% de fórmula láctea, la $X_{ac} - X_h$ fue más baja con 0.4% que con 0.2% de goma, sin diferencias significativas entre tipo de goma, excepto la mezcla con GM al 0.2%, que fue 6.5% más alta que la mezcla sin goma. En cambio, con 39% de fórmula láctea, el efecto fue contrario, ya que la $X_{ac} - X_h$ fue del orden de 19.6% más alta con 0.4% de GM y sin diferencias significativas con 0.2%. Con 0.2% de GA la $X_{ac} - X_h$ fue 6.4% más alta y sin diferencias significativas con 0.4%.

Las gomas de este estudio cumplieron parcialmente la teoría de que los hidrocoloides o estabilizadores pueden retener agua y aumentar la cantidad de agua no congelable (Goff y Caldwell, 1991), porque ese efecto fue dependiente de la cantidad de sólidos (fórmula láctea y

goma) presentes en la mezcla. De acuerdo a Wolfe et al. (2002), la existencia de agua sin congelar a temperaturas de congelación, en presencia de hielo y otros nucleadores, se puede atribuir principalmente a tres efectos: (1) la disminución del punto de congelación debida a los solutos de tamaños moleculares pequeños, (2) la disminución del punto de congelación debida a las macromoléculas, membranas y otras estructuras hidrófilas, y (3) el efecto de la viscosidad.

Considerando los primeros dos factores que menciona Wolfe et al. (2002), la formulación láctea contenía muchos solutos diferentes; alrededor de 46% de tamaños moleculares pequeños (azúcares, minerales y vitaminas) y 52% de macromoléculas (grasa butírica y caseína, principalmente), que se incrementaron con la adición de 0.2% o 0.4% de gomas; que pudieran ser las responsables de la diversidad en las respuestas de la congelación. Sin embargo, hay estudios que mencionan que los estabilizadores no afectan significativamente las características de congelación de una mezcla de helado, cuando se comparan con el efecto de los edulcorantes (Degner, et al., 2014). Pero hay que considerar que las dos gomas contienen en su estructura, en diferente proporción, fracciones de arabinogalactanos, glicoproteínas y proteínas (López-Franco et al., 2012), que pudieran formar una película en la interface hielo/agua o hielo/solución que inhiba la propagación de los núcleos sin impedir que el agua se congele (Ustun et al., 2015).

El tercer factor que menciona Wolfe et al. (2002), el efecto de la viscosidad; en este estudio se observó que la viscosidad dinámica de la solución agua/goma de mezquite fue menor que con goma arábica a 25°C (Figura 6). Esta propiedad hidrodinámica pudiera ser útil para explicar las diferencias en las propiedades de la congelación de las mezclas, infiriendo que la GM pudiera contribuir a disminuir el incremento de la viscosidad del agua sin congelar, retrasando el crecimiento de la interfaz hielo (Wolfe et al., 2002), pero para concluir con más certeza, se necesitan estudios con técnicas espectrométricas, reológicas y microscópicas en condiciones de sub-enfriamiento.

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizaron diferentes análisis para determinar si la goma de mezquite (*Prosopis spp*) posee características fisicoquímicas y funcionales, que puedan ser de utilidad como una estabilizante en una formulación láctea para helados.

Las propiedades de superficie y reológicas que presentó la solución agua/GM fueron una mayor actividad superficial a concentraciones $>0.2\%$, lo que favorecería su adsorción en la interface agua/aire durante la etapa de congelación dinámica para la oclusión de burbujas de aire. La capacidad de reducir la energía interfacial y evitar la coalescencia de las gotitas de grasa butírica la presentó a las dos concentraciones estudiadas, lo que indica que podría coadyuvar en la formación de la estructura adecuada de la grasa en el helado favoreciendo sus características sensoriales. También es una ventaja que presentara un comportamiento cercano al newtoniano al aumentar las velocidades de cizalla, ya que durante la elaboración de helados el establecimiento del equilibrio entre velocidad de corte y la viscosidad es importante para la velocidad de congelación y por ende en el tamaño de los cristales de hielo. La función estabilizante dependió de la composición química de las gomas, específicamente del contenido de polisacáridos y proteína.

La solución agua/0.4% GM, redujo el tiempo de Sub-E y de DesC, que pudiera favorecer la morfología, el tamaño y la distribución de los cristales de hielo, sin embargo, al observar este comportamiento con los sólidos de la formulación láctea, se disminuyó el tiempo y se aumentó la temperatura de Sub-E y disminuyó el tiempo de C, lo que podría favorecer la formación de cristales de hielo pequeños. Además, la DesC de la solución agua/goma fue más lenta y éste comportamiento se mantuvo sólo con 39% de fórmula láctea. Con esto se puede concluir que se podría formular con 0.4% de GM y 39% de fórmula láctea.

La relación entre las características químicas y las propiedades fisicoquímicas de la goma de mezquite (*Prosopis spp*), sugieren que puede ser utilizado como un estabilizante en una formulación láctea para helados e incluso, sugieren una potencial aplicación industrial, así como la importancia del cultivo de esta especie, sustituyendo a la goma arábica (*Acacia spp*) que debido a su falta de disponibilidad, se ha visto reducida su utilización en este tipo de productos.

RECOMENDACIONES

Determinar el efecto de la concentración de la goma de mezquite (*Prosopis spp*) en las propiedades de la congelación y la descongelación en una solución agua-goma, en un calorímetro diferencial de barrido (DSC) y compararlas con la goma arábica (*Acacia spp*)

Determinar el efecto de la concentración de los ingredientes base de un helado lácteo, en las propiedades de la congelación y la descongelación de una solución agua/goma de mezquite a las concentraciones 0.2% y 0.4%, en un calorímetro diferencial de barrido (DSC) y compararlas con la goma arábica con la misma concentración.

Elaborar un análisis de cristalografía de rayos x, para conocer más a detalle sobre la estructura de la goma de mezquite (*Prosopis spp*) y compararla con la de la goma arábica (*Acacia spp*).

Elaborar un análisis sensorial y de vida de anaquel de un helado lácteo, con las cantidades de goma de mezquite (*Prosopis spp*) e ingredientes base utilizadas y compararlo con un helado elaborado con las mismas cantidades de goma arábica (*Acacia spp*).

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Assaf S., Phillips G. O., Aoki H., & Sasaki Y. 2007. Characterization and properties of Acacia senegal (L.) Willd. var. senegal with enhanced properties (Acacia (sen) SUPER GUM): Part 1 – controlled maturation of Acacia Senegal var. senegal to increase viscoelasticity, produce a hydrogel form and convert a poor into a good emulsifier. *Food Hydrocolloids*. 21: 319–328 p.
- Anderson D.M.W., & Morrison N.A. 1989. The characterization of four Acacia gums which are not permitted food additives, *Food Hydrocolloids*, 3–57.
- Badui B.S. 2006. *Química de los Alimentos*. 4ta ed. Pearson Educación, México. 48–51 p.
- Berger K.G. 1997. Ice cream. *Food Emulsions*. 3d ed. New York: Marcel Dekker. 413–490 p.
- Bouyer E., Mekhloufi G., Rosilio V., Grossiord J-L., Agnelya F. 2012. Proteins, polysaccharides, and their complexes used as stabilizers for emulsions: Alternatives to synthetic surfactants in the pharmaceutical field? *International Journal of Pharmaceutics* 436: 359–378
- Clarke C. 2004. *The science of ice cream*. 2da ed. IUPAC, EUA. 38-51 p.
- Cleland D.J. y Valentas K.J. 1997. Prediction of Freezing Time and Design of Food Freezers. Capítulo 3 en *Handbook of Food Engineering Practice*, Edited by K. Valentas, E. Rotsrein, and R.P. Singh. CRC Press, New York. 71-123 p.
- CONAFOR, Comisión Nacional Forestal. (2002). Diversificación productiva y aprovechamiento del mezquite *Prosopis spp*. En el estado de Sonora. Comisión Nacional Forestal. México. 31: 379-386. Disponible en: www.conafor.gob.mx. (Fecha de acceso: 30 de Enero del 2016).
- Cook K.L.K., Hartel, R.W. 2010. Mechanisms of ice crystallization in ice cream production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 9: 213–222 p.

- Cubero N., Monferrer A., Villalta J. 2002. Aditivos alimentarios. 1ra ed. Mundi-prensa, España. 110-125 p.
- Degner B.M., Chung C., Schlegel V., Hutkins R., McClements D.J. 2014. Factors Influencing the Freeze-Thaw Stability of Emulsion-Based Foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 13: 98 – 113 p.
- Dickinson E., Murray B.S., Stainsby G., Anderson D.M.W. 1988. Surface activity and emulsifying behaviour of some Acacia gums. *Food Hydrocolloid*. 2: 477-490 p.
- Dickinson E. 2003. Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. *Food Hydrocolloids*, 17, 25-39.
- El Financiero (2014). Disponible en: <http://www.elfinanciero.com.mx/economia/ven-alto-potencial-de-crecimiento-de-industria-del-helado.html>. (Fecha de acceso: 20 de abril del 2016).
- Evans J.A., 2008. *Frozen Food Science and Technology*. Wiley Online Library.
- FDA, Food and Drug Administration (2016). Food Additive Status List. Food and Drug Administration. Disponible en: <http://www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/foodadditivesingredients/ucm091048.htm#ftnT>. (Fecha de acceso 20 de abril del 2016).
- Fincher G.B., Stone B.A., Clarke A.E. 1983. Arabinogalactan-proteins: structure, biosynthesis, and function. *Annu Rev Plant Physiol*, 34, 47–70 p.
- Garti N., Slavin Y., Aserin A. 1999. Surface and emulsification properties of a new gum extracted from *Portulaca oleracea* L. *Food Hydrocolloids*. 13: 145-155 p.
- Goff H.D. 1992. Examining the milk solids-notfat in frozen dairy desserts. *Modern Dairy*. 71 (3):16–17 p.

- Goff H.D. 1994. Measuring and interpreting the glass transition in frozen foods and model systems. *Food Research International*. 27(2): 187–189.
- Goff H. D. 2003. Protein-polysaccharide functionality and interactions in frozen dairy desserts. In *Proceedings of the 3rd international symposium on food rheology and structure*. Laboratory of Food Process Engineering: ETH Zurich, Switzerland. 57-63 p.
- Goff H.D., Caldwell K.B. 1991. Stabilizers in ice cream. How do they work? *Modern Dairy*. 70 (3):14–15.
- Goff H.D., Ferdinando H., Schorsch C. 1999. Fluorescence microscopy to study galactomannan structure in frozen sucrose and milk protein solutions. *Food Hydrocoll.* 13: 353–364.
- Goff H.D., Hartel W.R. 2013. *Ice Cream*. 7ma ed. Springer, New York, EUA. 9-333 p.
- Goff H.D., Jordan W.K. 1989. Action of emulsifiers in promoting fat destabilization during the manufacture of ice cream. *J Dairy Sci.* 72:18–29.
- Goycoolea F. M., Morris E. R., Richardson R. K., Bell A. E. 1995. Solution rheology of mesquite gum in comparison with gum arabic. *Carbohydrate Polymers*, 27: 37–45.
- Goycoolea F.M., Calderón de la Barca A.M., Balderrama J.G., Valenzuela J.R. 1997. Immunological and functional properties of mesquite gum from northwestern mexican mesquite (*Prosopis spp*) in comparison with gum arabic. *Int. J. Biol. Macromol.* 21, 29–36.
- Goycoolea F. M., Calderón de la Barca A. M., Balderrama J. R., Valenzuela J. R., Hernandez G. 1998. Processing and functional behaviour of low tannin mesquite gum. *Special Publication-Royal Society of Chemistry*, 218: 305-313.
- Goycoolea F.M., Cárdenas A., Hernández G., Lizardi J., Álvarez G., Soto F.J. 2000. Polisacáridos aislados del mezquite y de otras plantas del desierto. II Simp. Int. Utilización y Aprovechamiento de la Flora Silvestre de Zonas Áridas. Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México. 245–260 p.

- Gracia O. 1998. "LA GOMA ARÁBIGA: Una maravilla natural que nos beneficia a todos". Director Comercial de Gomas Naturales S.A. de C.V. Industria Alimentaria. 4–12 p.
- Hernandez E., Baker R. A., Crandall P. G. 1991. Model for evaluating turbidity in cloudy emulsions. *Journal of Food Science*, 56: 747–750.
- Hoefler, A.C. 2004. Hydrocolloids. Eagan Press Handbook Series. St. Paul, MN, EUA, pp 27-41.
- IDFA, International Dairy Foods Association (2016). Disponible en: <http://www.idfa.org/news-views/media-kits/ice-cream/ice-cream-sales-trends>. (Fecha de acceso: 23 de mayo de 2016).
- Idris O.H.M., Williams P. A., & Phillips G. O. 1998. Characterisation of gum from Acacia senegal trees of different age and location using multidetection gel permeation chromatography. *Food Hydrocolloids*. 12: 379–388.
- Ikeda S., Funami T., and Zhang G. 2005. Visualizing surface active hydrocolloids by atomic force microscopy. *Carbohydrate Polym.* 62:192–196.
- INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (1994). Mezquite *Prosopis* spp. Cultivo alternativo para las zonas áridas y semiáridas de México. Disponible en: www.inecc.gob.mx. (Fecha de acceso: 20 de Noviembre 2015).
- Izydorczyk M.S., Biliaderis C.G., Bushuk W. 1991. Physical properties of water-soluble pentosans from different wheat varieties. *Cereal Chemistry*. 68: 145-150.
- Khan N.M., Mua T-H, Ali F., Arogundade L.A., Khan Z.U, Zhang M., Ahmad S., Sun H-N. 2015. Effects of high hydrostatic pressure on emulsifying properties of sweet potato protein in model protein–hydrocolloids system. *Food Chemistry* 169: 448–454.
- Krog N. 1998. The use of emulsifiers in ice cream. In: Buchheim W., ed. *Ice Cream*. Brussels: International Dairy Federation. 37–44 p.

- Li X., Fang y., Al-Assaf s., Phillips G.O., Nishinari K., Zhang H. 2009. Rheological study of gum arabic solutions: Interpretation based on molecular self-association. *Food Hydrocolloids*. 23: 2394–2402.
- López-Franco Y.L., Valdez M.A., Hernández J., Calderón de la Barca A.M., Rinaudo M., Goycoolea F.M. 2004. Macromolecular dimensions and mechanical properties of monolayer films of Sonorean mesquite gum. *Macromol. Biosci*. 4: 865-874.
- López-Franco Y.L., Calderon de la Barca A.M., Valdez M.A., Peter M.G., Rinaudo M., Chambat G., et al. 2008. Structural characterization of mesquite (*Prosopis velutina*) gum and its fractions. *Macromol. Biosci*. 8: 739-747.
- López-Franco Y.L., Córdova-Moreno R.E., Goycoolea F.M., Valdez M.A., Juárez-Onofre J. Lizardi-Mendoza J. 2012. Classification and physicochemical characterization of mesquite gum (*Prosopis spp.*). *Food Hydrocolloids*. 26(1): 159-166.
- Madrid V.A., Cenzano I. 2003. Helados: elaboración, análisis y control de calidad. Mundi-prensa. España. 1: 35-40 p.
- MAGyP, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2005). Guía para la Elaboración de Helados. 13-40 p.
- Mahaut M., Jeanent R., Schuck P., Brule G. 2004. Productos lácteos industrias. Acribia, Zaragoza. 230-233 p.
- Marshall R.T., Goff H.D., Hartel R.W. 2003. Ice Cream. 6ta ed. New York: Kluwer. 441-460 p.
- Mbuna J. J., Mhinzi G. S. 2003. Evaluation of gum exudates from three selected plant species from Tanzania for food and pharmaceutical applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 83: 142-146 p.
- McClements D.J. 2000. Comments on viscosity enhancement and depletion flocculation by polysaccharides. *Food Hydrocolloids*. 14: 173–177 p.

- Meza S.R., Osuna L.E. 2003. Estudio Dasométrico del Mezquite en la Zona de Las Pocitas, B.C.S. INIFAP, Campo Experimental Todos Santos. México. 56 p.
- Mirhosseini H., Amid B.T. 2012. A review study on chemical composition and molecular structure of newly plant gum exudates and seed gums. *Food Research International*. 16: 387-398.
- Mothè C. G., & Rao M. A. 2000. Thermal behavior of gum arabic in comparison with cashew gum. *Thermochimica Acta*. 357: 9–13.
- Mundo Helado. 2006. Estabilizantes Usados en Helados. Oficinas en la ciudad de México, México. Disponible en: www.mundohelado.com. (Fecha de acceso: 20 Diciembre del 2015).
- NOM-036-SSA1-1993, Norma Oficial Mexicana Bienes y Servicios. Helados de crema, de leche o grasa vegetal, sorbetes y bases o mezclas para helados. especificaciones sanitarias (1993). Disponible en: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/036ssa13.html> (Fecha de acceso: 10 de junio de 2016).
- Osman M. E., Williams P. A., Menzies A. R., Phillips G. O. 1993. Characterization of commercial samples of gum-arabic. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 41: 71-77 p.
- Orozco-Villafuerte J., Cruz-Sosa F., Ponce-Alquicira E., Vernon-Carter E.J. 2003. Mesquite gum: fractionation and characterization of the gum exuded from *Prosopis laevigata* obtained from plant tissue culture and from wild trees. *Carbohydrate Polymers*. 54: 327–333 p.
- Patwardhan P.R., Brown R.C., Shanks B.H. 2011. Products distribution from the fast pyrolysis of hemicellulose. *ChemSusChem*. 4: 636 – 643 p.
- Petzold G., Aguilera J.M. 2009. Ice morphology: fundamentals and technological applications in foods. *Food Biophysics*. 4(4): 378–396.

- Rahman M. S., Guizani N., Al-Khaseibi M., Al-Hinai S. A., Al-Maskri S. S., & Al-Hamhami K. 2002. Analysis of cooling curve to determine the end point of freezing. *Food Hydrocolloids*, 16(6), 653-659 p.
- Rao M.A. 2007. Flow and Functional Models for Rheological Properties of Fluid Foods. *Rheology of Fluid and Semisolid Foods Principles and Applications*, 2da ed. Springer, New York, NY, USA. 2: 27-30 p.
- Rebollo L. 2008. Manual de Procedimientos para el Desarrollo de un Helado Reducido en Calorías. Universidad Nacional Autónoma de México, Cuatitlán Izcalli, Edo. De México. 17 p.
- Salvadori, V. O. 1994. Transferencia de calor durante la congelación, el almacenamiento y la descongelación de alimentos (Doctoral dissertation, Facultad de Ingeniería). Capítulo 3-32 p.
- Sanchez C., Lapp A., Schmitt C., Gaillard C., Kolodziejczyk C. E., & Renard D. 2008. The Acacia gum arabinogalactan fraction is a thin oblate ellipsoid: a new model based on SANS and ab initio calculation. *Biophysical Journal*. 94: 629–639 p.
- Schwartzberg H., Singh P.R., Sarkar A. 2007. Freezing and Thawing of Foods – computation methods and thermal properties correlation, capitulo 3 en *Heat Transfer in Food Processing*. Edited by S. Yanniotis & B. Sunden. WIT Press, UK. 61-83 p.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2014). Distribución de las tierras secas de México. Disponible en: <http://apps1.semarnat.gob.mx/>. (Fecha de acceso: 09 de Junio 2016).
- Simões J., Maricato E., Nunes F.M., Domingues M.R., Coimbra M.A. 2014. Thermal stability of spent coffee ground polysaccharides: Galactomannans and arabinogalactans. *Carbohydrate Polymers*. 101: 256– 264 p.
- Turan S., Kirkland M., Trusty P.A., Campbell I. 1999. Interaction of fat and air in ice cream. *Dairy Ind Int*. 64: 27–31 p.

- Ustun N. S., Turhan S. 2015. Antifreeze Proteins: Characteristics, Function, Mechanism of Action, Sources and Application to Foods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 3189-3197 p.
- Wang L., Weller C. L. 2005. Thermophysical Properties of Frozen Foods. *Handbook of Frozen Food Processing and Packaging*, 102-104 p.
- Wang X., Wang S., Xu Q., Mi J. 2015. Thermodynamics of ice nucleation in liquid water. *The Journal of Physical Chemistry B*, 119(4), 1660-1668 p.
- Williams P. A., & Phillips G. O. 2000. Gum arabic. 1ra ed. *Handbook of hydrocolloids*. New York: CRC Press. 9: 155–168 p.
- Wiktor A., Schulz M., Voigt E., Witrowa-Rajchert D., Knorr D. 2015. The effect of pulsed electric field treatment on immersion freezing, thawing and selected properties of apple tissue. *Journal of Food Engineering*. 146: 8–16 p.
- Wolfe J., Bryant G., Koster K.L. 2002. What is 'unfreezable water', how unfreezable is it and how much is there?. *CryoLetters* 23, 157-166 p.
- Yadav M.P., Igartuburu J.M., Yan Y., Nothnagel E.A. 2007. Chemical investigation of the structural basis of the emulsifying activity of gum Arabic. *Food Hydrocolloids* 21: 297–308.
- Zohuriaan M. J., & Shokrolahi F. 2004. Thermal studies on natural and modified gums. *Polymer Testing*. 23: 575–579 p.