



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**Efecto de fructanos de agave sobre la formación y
estabilidad de espumas a base de proteínas de
suero lácteo con goma xantana**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

P R E S E N T A:

MARÍA CONCEPCIÓN DOLORES BECERRA

ASESORA: DRA. MARÍA GUADALUPE SOSA HERRERA

COASESORA: DRA. LAURA PATRICIA MARTÍNEZ PADILLA

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉX. 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de Tesis**

Efecto de fructanos de agave sobre la formación y estabilidad de espumas a base de proteínas de suero lácteo con goma xantana.

Que presenta la pasante: **María Concepción Dolores Becerra**

Con número de cuenta: **412019214** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 20 de Septiembre de 2016.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	I.A. Patricia Muñoz Aguilar	
VOCAL	I.A. Miriam Alvarez Velasco	
SECRETARIO	Dra. María Guadalupe Sosa Herrera	
1er. SUPLENTE	Dra. Virginia Agustina Delgado Reyes	
2do. SUPLENTE	I.A. Fátima Abigail Galván Ballesteros	

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos (Karlo incluido), por todo el cariño y apoyo brindado a lo largo de mi vida; y que con base a sus ejemplos y consejos me ayudaron a formarme como una mejor persona.

A mis asesoras de tesis, Dra. María Guadalupe Sosa Herrera y Dra. Laura Patricia Martínez Padilla, por orientarme y auxiliarme durante el desarrollo del proyecto que culminó en la elaboración de esta tesis.

A los profesores que durante mi vida académica han contribuido a enriquecer mi formación profesional.

A todas esas personas que de mil maneras me han animado a continuar superándome día a día.

A la DGAPA-UNAM, Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, PAPIIT IN118214, “Propiedades reológicas y fisicoquímicas de biomoléculas funcionales de interés en la formación de sistemas coloidales alimenticios”, por la beca recibida y el apoyo financiero para el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN	3
1. ANTECEDENTES	6
1.1. Espumas	6
Formación de espumas	7
Estabilidad de espumas	12
Mecanismos de desestabilización	13
Maduración de Ostwald	14
Drenado	15
Coalescencia	16
1.2. Biopolímeros empleados en espumas	17
Concentrado de proteínas de suero lácteo	21
Goma xantana	24
Fructanos de agave	27
2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	32
2.1. Objetivos	32
Objetivo general	32
Objetivo particulares	32
2.2. Materiales	32
2.3. Métodos	33
2.3.1. Preparación de muestras	33
2.3.2. Caracterización de los sistemas acuosos	33
pH	33
Densidad relativa	34
Pruebas de flujo	34
2.3.3. Caracterización de espumas	35
Densidad relativa	35
Capacidad espumante	35
Dispersión-retrodispersión de la luz sobre la muestra	36
Drenado gravimétrico	38

Tamaño de burbuja.....	39
Determinación de parámetros texturales	39
3. RESULTADOS.....	41
3.1. Propiedades de la fase acuosa.....	41
pH.....	41
Densidad relativa	42
Pruebas de flujo	42
3.2. Propiedades de las espumas	47
Densidad relativa	47
Capacidad espumante	48
Estabilidad por transmisión-retrodispersión de luz.....	49
Tamaño de burbuja.....	54
Estabilidad por drenado gravimétrico	57
Parámetros texturales.....	60
CONCLUSIONES	64
REFERENCIAS.....	67

RESUMEN

La presente investigación se realizó con el objetivo principal de estudiar la estabilidad y las propiedades de espumas a base de concentrado de proteínas de suero lácteo al 15% y goma xantana al 0.1%, con la inclusión de fructanos de agave a concentraciones de 1, 5, 10, 15, 20 y 25%, y así poder delimitar la funcionalidad de los fructanos de agave en el sistema, debido a que éstos son de reciente interés dentro de la industria alimenticia. Se estudió la influencia de la fase continua sobre la estabilidad de las espumas, por medio de la obtención de pH, densidad relativa y reología (flujo); se realizó el seguimiento de la estabilidad de las espumas por tres métodos diferentes: dispersión-retrodispersión de la luz, diámetro de burbujas y drenado volumétrico con respecto al tiempo, también se determinaron las propiedades de rendimiento volumétrico, densidad relativa y parámetros texturales.

Se demostró el aumento de la estabilidad de las espumas con respecto a la concentración de fructanos de agave presentes, debido principalmente al incremento en la viscosidad de la fase continua, sin impactar significativamente en el rendimiento volumétrico; así como la modificación de las propiedades texturales.

El aumento de la viscosidad con respecto a la concentración de fructanos de agave se debió posiblemente a la interacción por puentes de hidrogeno de los grupos hidroxilo de los fructanos de agave con los grupos polares de la superficie de las proteínas del concentrado de suero lácteo, aunado al efecto sinérgico entre éste y la goma xantana por incompatibilidad termodinámica.

INTRODUCCIÓN

Las espumas son sistemas dispersos termodinámicamente inestables en el que el gas es mantenido transitoriamente una fase dispersa en una matriz líquida (Naranjo-Delgado *et al.*, 1995). El objetivo de la elaboración de espumas en la industria alimenticia es reducir la densidad del producto, modificar las propiedades reológicas y texturales, incrementar la digestibilidad y disminuir el contenido calórico del producto, así como modificar sus características sensoriales (Liszka-Skozylas *et al.*, 2014). La estabilización de este tipo de sistemas recibe gran atención por parte de investigadores, siendo una fuerte motivación el hecho de reconocer que la estabilidad a largo plazo es un logro de mayor dificultad, en comparación con otros sistemas, como las emulsiones (Dickinson, 2010).

Las espumas más comunes en los alimentos se forman al disminuir la tensión superficial en la interfase gas-líquido por medio de agentes tensoactivos, tales como proteínas o, en algunos casos, carbohidratos (Badui, 2006). Las proteínas de suero lácteo, en forma de concentrados o aislados, son de amplia aplicación en la industria alimenticia (Liszka-Skozylas *et al.*, 2014). Si bien las principales proteínas que componen al concentrado de suero lácteo: β y α lactoglobulina, son de lenta adsorción en la interfase, forman interfaces elásticas, las cuales resultan mayormente estables. En sistemas modelo, el concentrado de proteínas de suero lácteo forma espumas con rendimientos volumétricos y límites de deformación elástica mayores a concentraciones alrededor del 15% (Luck *et al.* 2002; Phillips y Williams, 2011).

Para aumentar la estabilidad de las espumas formadas con concentrado de proteínas de suero lácteo pueden agregarse biopolímeros, tales como los polisacáridos; éstos aportan estabilidad a los sistemas mediante el control de la reología de la fase acuosa, aumentando la viscosidad de ésta; o el aumento del espesor de la película viscoelástica formada (Dickinson e Izgi, 1996). La goma xantana es un polisacárido ampliamente utilizado industrialmente debido a la combinación de propiedades únicas que presenta, en comparación con otros; entre estas características destacan la capacidad de generar altas viscosidades a bajas concentraciones, alta estabilidad en

un rango amplio de temperatura y pH, y alta solubilidad en medios acuosos (Matyjaszewski y Möller, 2012).

La mezcla de concentrado de proteínas de suero lácteo con goma xantana en la formación de espumas muestra diversos efectos favorecedores para los sistemas: se presenta un incremento de la viscosidad de la fase continua (Liszka-Skozylas *et al.*, 2014; Martínez-Padilla *et al.*, 2015), disminuyendo el movimiento de las burbujas de gas y retrasando los fenómenos de desestabilización del sistema (Huppertz., 2010). Se reportó también que la presencia de goma xantana no resultó significativa en el rendimiento volumétrico obtenido, aunque si con respecto a la densidad de la espuma, la cual tendía a aumentar; respecto al tamaño de burbuja disperso, se reportó una disminución de los diámetros de éstas con respecto al aumento de la concentración de goma xantana. Perez *et al.* (2010) sugieren que el principal mecanismo de interacción entre ambos biopolímeros podría ser una segregación interfacial entre ellos debido a la incompatibilidad termodinámica entre las proteínas del concentrado y la goma xantana en las inmediaciones de la interfase aire/agua.

Los fructanos de agave son un grupo de carbohidratos de reserva de origen vegetal que presentan una variedad de propiedades benéficas a la salud, tales como representar una fuente de fibra dietética soluble, promover la producción de péptidos supresores del apetito e incretinas, con efectos prometedores sobre el metabolismo de la glucosa, el peso corporal y el desarrollo de masa grasa en el cuerpo; al no poder ser digerida, es fermentado por las bacterias intestinales benéficas, por lo cual también tiene cualidades prebióticas, así como también promueve la reabsorción del calcio y por lo tanto podría ser útil en la prevención de la osteoporosis (Ritsema y Smeekens, 2003; Crispín-Isidro *et al.*, 2015). Se sabe que los fructanos de agave presentan alta solubilidad y alta afinidad en interfases lipídicas (Demel *et al.*, 1998); estudios realizados por Crispín-Isidro *et al.* (2015) en yogurt batido bajo en grasa mostraron que la inclusión de éstos modificó las propiedades estructurales, reológicas y sensoriales del yogurt debido a la interacción con las macromoléculas presentes en el yogurt; los autores sugieren con base en micrografías que las moléculas de fructanos se depositan sobre la superficie de las micelas de caseína, reforzando la red estructural del yogurt; por lo cual resulta de gran interés evaluar su aplicación en formulaciones

para el desarrollo de sistemas dispersos aplicables en productos alimenticios funcionales a base de proteínas lácteas.

1. ANTECEDENTES

1.1. Espumas

Las espumas pueden definirse como una sub-categoría de los denominados materiales celulares, como una mezcla de dos fases en la cual un gas está contenido en una fase líquida, semi-sólida o sólida (Zabler, 2014). Este sistema está constituido de una dispersión de burbujas de gas (generalmente aire) suspendidas en el seno de un líquido viscoso o de un material viscoelástico, y se producen por una adsorción de moléculas reactivas en la interfase gas-líquido; el fluido que se localiza entorno a los glóbulos de gas se designa con el nombre de lamela y sirve como estructura básica; lo anteriormente mencionado se esquematiza de manera sencilla en la Figura 1.1 (Badui, 2006).

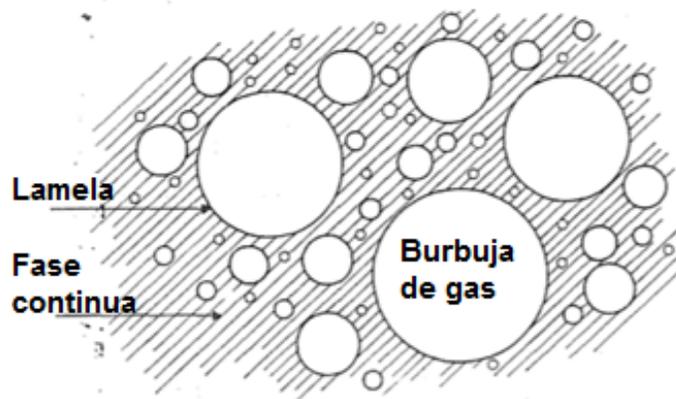


Figura 1.1 Representación esquemática de una espuma (Badui, 2006).

Cuando partículas sólidas de tamaño nanométrico se dispersan en un líquido y luego la dispersión se mezcla con gas, se refiere a espumas semi-sólidas, ejemplo de ello son las espumas estabilizadas con proteínas globulares o micelares. El efecto de las partículas es estabilizar (en el tiempo) la lamela mediante la formación de una red de enlaces o agrupándose dentro de las paredes de las celdas de aire, al mismo tiempo que disminuyen la velocidad del drenado de líquido (Zabler, 2014).

La formación de espumas con proteínas implica un proceso de desnaturalización controlado, ya que éstas tienen que desdoblarse para orientar sus aminoácidos

hidrófobos hacia el interior de la burbuja y los hidrófilos hacia el exterior, en contacto con la fase acuosa (Badui, 2006).

En cierto sentido, las espumas se parecen mucho a las emulsiones; ambas son dispersiones de un fluido hidrófobo en un líquido hidrófilo (Fennema, 2000). Sin embargo, las diferencias cuantitativas son considerables, por lo que sus propiedades son también cualitativamente distintas (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1. Comparación de las espumas y las emulsiones: orden de magnitud de los valores de algunos parámetros (Fennema, 2000).

Propiedad	Emulsiones	Espumas
Diámetro de partícula (m)	2×10^{-7} a 10^{-5}	1×10^{-4} a 3×10^{-3}
Fracción volumen de partícula	0.01 a 0.8	0.5 a 0.97
Diferencia de densidad entre la fase dispersa y fase continua (kg/m^3)	10 a 100	1000
Compresibilidad de la fase dispersa (m^2/N)	5×10^{-10}	1×10^{-5}
Tensión interfacial (N/m)	10^{-3} a 10^{-2}	0.03 a 0.05
Presión de Laplace (N/m^2)	10^4	10^2
Solubilidad de la fase dispersa en la fase continua (% volumen)	0 (Aceite/Agua), 0.15 (Agua/Aceite)	2.2

El diámetro de burbuja en las espumas es tan grande que las excluye del dominio de los coloides. Esta diferencia de tamaño, así como la diferencia de densidad entre las fases determinan que las espumas se separen a una velocidad mayor que las emulsiones. La solubilidad relativamente alta del aire en el agua produce una difusión o maduración de Ostwald rápida, y si la fase dispersa está formada por dióxido de carbono, esta solubilidad aumenta (Fennema, 2000).

Formación de espumas

Los requisitos para la formación de una espuma incluyen un gas, agua, un surfactante y energía. El surfactante es requerido para disminuir la tensión superficial entre el gas y el agua y de este modo facilitan la formación de burbujas pequeñas de gas (Huppertz, 2010). En espumas acuosas, estos agentes son generalmente hidrófilos en un extremo, e hidrófobos en el otro, teniendo entonces una tendencia natural a formar membranas en mezclas agua-gas (Zabler, 2014); en la mayoría de las espumas alimenticias, los surfactantes son las proteínas presentes en el sistema. Se requiere

energía para vencer la energía libre entre las fases del sistema, la cual se incrementa en el espumado debido al aumento del área superficial. Durante la formación de burbujas de gas en el líquido, éstas deben tener el tiempo suficiente para formar una lamela en la interfase (Huppertz, 2010).

Las propiedades físicas de las espumas dependen principalmente de sus propiedades estructurales, tal como la fracción de gas (ϕ , relación entre el volumen de gas y el volumen de la espuma resultante) o la distribución de tamaño de burbujas. Con motivo de tener control sobre estos parámetros, se han desarrollado varias técnicas de formación de espumas. Todas las técnicas de espumado tienen en común la generación de burbujas dentro de un líquido. Esto implica la creación de interfases gas/ líquido con cierta tensión interfacial, e involucra también una entrada de energía. Lo que distingue a las técnicas de espumado es la manera en la que esta energía es puesta dentro del líquido (Drenckhan y Saint-Jalmes, 2015). Las técnicas más comunes se resumen en el Cuadro 1.2.

Cuadro 1.2. Clasificación de las técnicas de espumado (Drenckhan y Saint-Jalmes, 2015).

Mecanismo global	Sub-mecanismo	Ejemplos
Espumado físico	Espumado mecánico	Burbujeo, generación de espumas en medios porosos, batido, mezcladores de rotor-estator, licuadora.
	Transición de fase	Extrusión, dispensadores de crema, cerveza y champagne.
Espumado químico	Reacción química	Pastillas efervescentes, polvo para hornear, espumado de poliuretano.
	Reacción electroquímica	Nucleación de burbujas en líquidos supersaturados.
Espumado biológico	Levaduras	Horneado.

Cualquier proceso de formación de espumas involucra la creación y deformación de la interfase gas/líquido. Aún si el mecanismo fundamental de formación es de naturaleza

no mecánica, el proceso de formación involucra un número de esfuerzos mecánicos. La presencia de agentes estabilizantes puede dar lugar a esfuerzos en la interfase importantes, interviniendo con la generación de burbujas (Drenckhan y Saint-Jalmes, 2015).

Otra manera de clasificar los métodos de formación de espumas es por el mecanismo fundamental por el cual se lleva a cabo la generación de burbujas individualmente. En este caso, se tienen dos categorías; en la primera de ellas, la interfase gas/líquido necesita someterse a un cambio topológico para crear la burbuja final (Figura 1.2). Liu y Schneider (2011) definen a un cambio topológico como la deformación de la forma de un objeto espacial, en la cual el objeto sufre una fragmentación, tal como la división de una esfera en dos mitades.

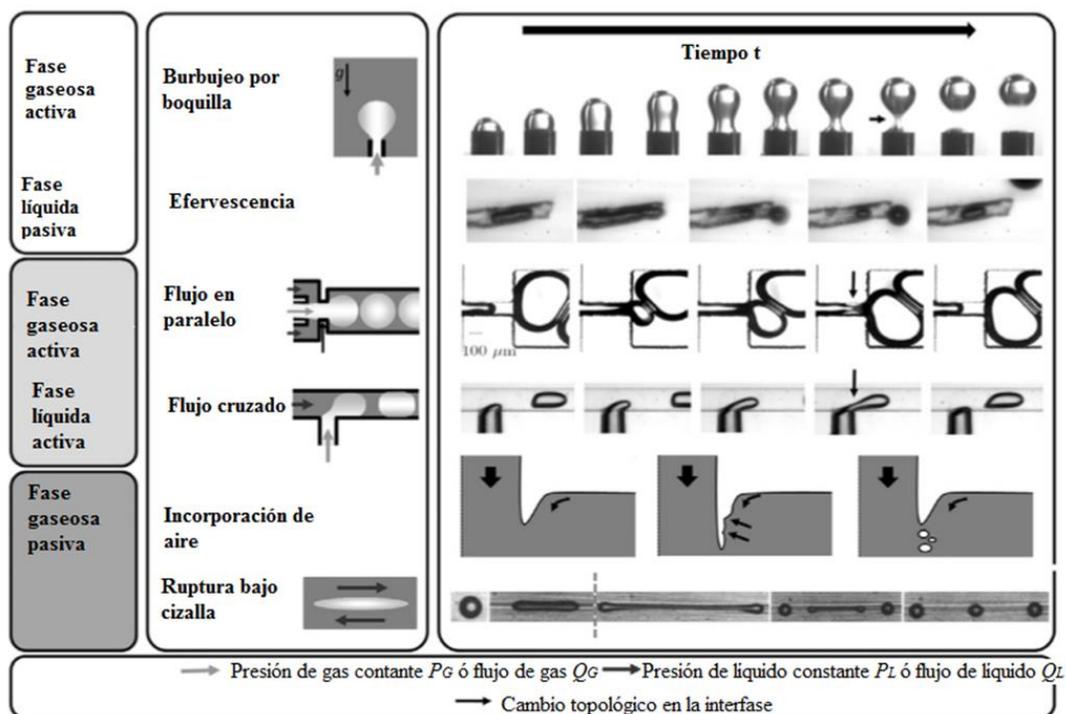


Figura 1.2. Diferentes vías de formación de burbujas que requieren de un cambio topológico. Activo y pasivo hacen referencia si la fase correspondiente está fluyendo en el proceso o no, respectivamente (Drenckhan y Saint-Jalmes, 2015).

El cambio topológico puede ocurrir de varias maneras. Por ejemplo, una burbuja puede desprenderse de una boquilla, o una burbuja grande puede romperse en otras más pequeñas debido a la aplicación de cizallamiento (Drenckhan y Saint-Jalmes, 2015). En la Figura 1.2 se esquematizan los mecanismos más comunes de formación de espuma debido a un cambio topológico; los cuales se diferencian con respecto a la fase del sistema que se encuentre fluyendo, así como las condiciones bajo las cuales se da el flujo. Sin embargo, el mecanismo de ruptura derivado del cambio topológico es el mismo: la interfase gas/líquido se convierte en un filamento delgado el cual es físicamente inestable y se rompe (Drenckhan y Saint-Jalmes, 2015).

En la segunda categoría, no es necesario que exista un cambio topológico en la interfase gas/líquido, y las burbujas son creadas libremente dentro del líquido por medio de una transición de fase o una reacción química (Figura 1.3) (Drenckhan y Saint-Jalmes, 2015).

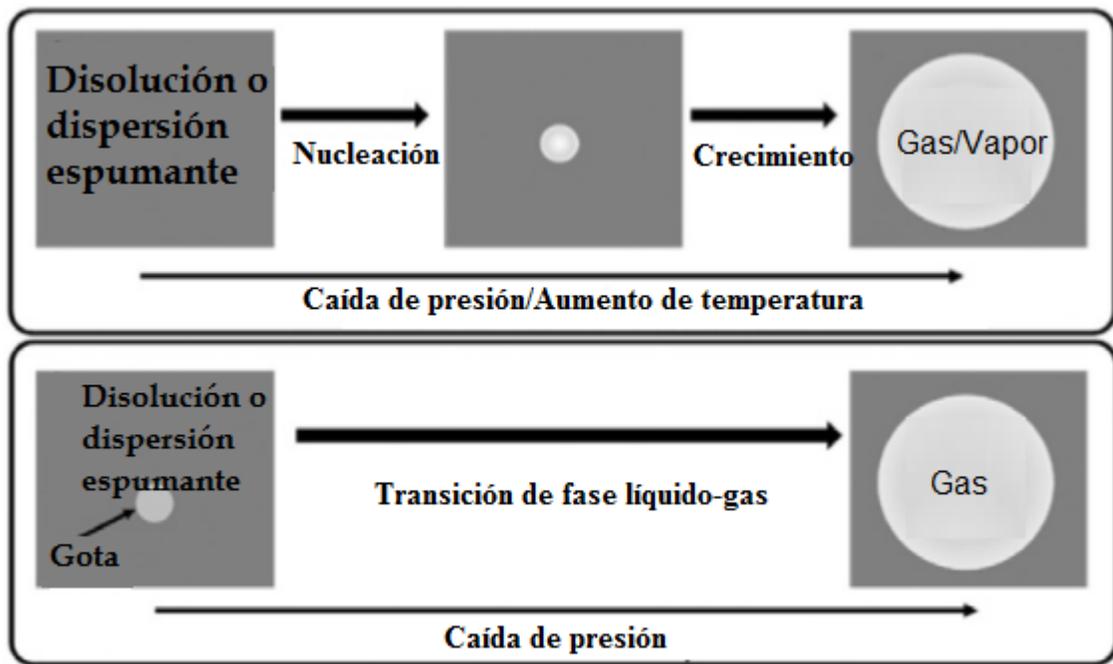


Figura 1.3. Esbozo de dos técnicas de generación de burbujas cuyos medios físicos no requieren de un cambio topológico en la interfase (Drenckhan y Saint-Jalmes, 2015).

El espumado por batido se encuentra dentro de los mecanismos físicos con cambio topológico; en éste, el aire es arrastrado a la superficie libre del líquido batido, el cual forma burbujas grandes que se rompen bajo la cizalla continua del batidor. Existe transferencia de energía mecánica hacia la interfase gas-agua. El batido inicialmente conduce a la formación de burbujas grandes las cuales se rompen en otras más pequeñas, produciéndose una amplia distribución del tamaño de burbuja. La interacción entre el aire y la ruptura de burbujas conduce a un incremento de la fracción de gas y disminuye el tamaño de burbuja promedio a lo largo del tiempo; el proceso continúa hasta alcanzar el equilibrio, en el cual la fracción de aire incorporado y el tamaño de burbuja dependen de las propiedades reológicas de la fase acuosa (Figura 1.4) y la velocidad de rotación del batidor. La concentración de surfactante y de partículas en la fase acuosa de las espumas conduce a la variación de la viscosidad de la disolución (Drenckhan y Saint-Jalmes, 2015; Fennema, 2000; Huppertz, 2010). Como criterio heurístico se tiene que a mayor viscosidad de la fase acuosa, las burbujas serán de menor tamaño y la fracción de gas incorporada será más baja. Dependiendo de la velocidad y tiempo de batido, el intervalo de tamaño de las burbujas será de entre 0.001 a 1 mm (Drenckhan y Saint-Jalmes, 2015).

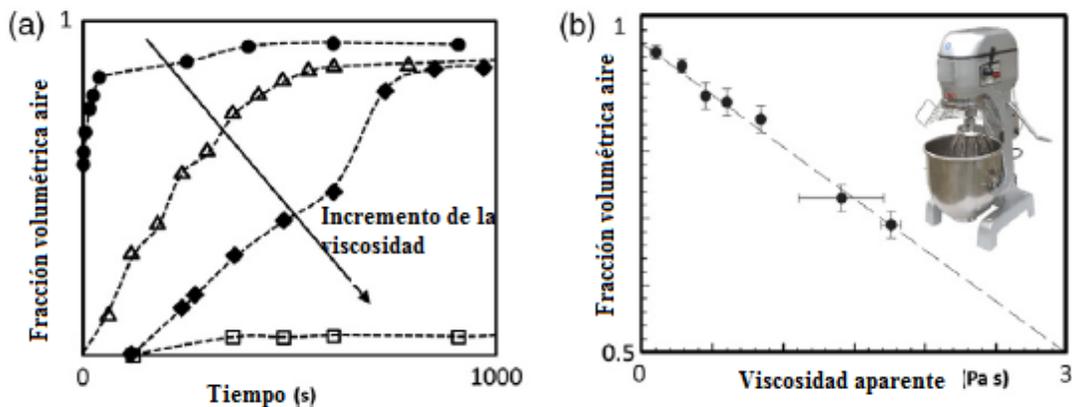


Figura 1.4 Espumado utilizando batidora de cocina. a) Cambio de la fracción volumétrica de aire incorporada a la espuma; b) Decremento lineal de la fracción volumétrica de aire incorporada con respecto a la viscosidad de la disolución espumante (Drenckhan y Saint-Jalmes, 2015).

Estabilidad de espumas

La estabilidad es una propiedad importante en las espumas alimenticias, debido a que la percepción de calidad por parte del consumidor está influenciado por la apariencia del producto. La estabilidad de espumas líquidas depende principalmente de la cantidad y viscosidad del líquido y del tipo de gas, es decir, de la capacidad de difusividad de las moléculas de gas en la fase líquida. Cuanto menor sea esta última, más estable será la espuma (Vaclavik y Christian, 2008).

La composición de la fase continua es importante en la estabilidad de la espuma, fases continuas espesas drenan a una velocidad menor que las que son fluidas, por lo cual, al aumentar la viscosidad en la fase reducirá el drenado (Vaclavik y Christian, 2008). La presencia de partículas suspendidas en la fase continua, como en dispersiones de proteínas, resulta un factor a considerar. Se ha demostrado que la presencia de partículas finamente suspendidas pueden formar espumas en la ausencia de surfactantes, al adsorberse en la interfase aire/agua y agregarse alrededor de las burbujas de espuma, creando una barrera estérica; si las partículas suspendidas interaccionan formando puentes entre ellas, fuerzan el contacto intermolecular, aumentando el área de contacto a medida que la espuma se seca, volviéndola más estable. La presencia de partículas suspendidas aumenta también la viscosidad total de la dispersión, permitiendo estabilizar el sistema formado. Por otra parte, la presencia de partículas de carácter hidrofóbico rompe las burbujas en las espumas, debido a las fuerzas de enlace opuestas (Hunter *et al.*, 2008).

En la formación de espuma, como en otras propiedades de superficie, las correlaciones entre la estructura surfactante y la formación del sistema disperso en solución acuosa requieren una distinción entre la eficiencia del agente tensoactivo (concentración en masa requerida para producir una cantidad significativa de espuma), y su eficacia (cantidad máxima de espuma obtenida con la solución de tensoactivo, independientemente de su concentración). Aunque todos los surfactantes tienen la capacidad de reducir la tensión superficial de las espumas, no todos pueden formar espumas estables, siendo incluso, supresores de espumado (Vaclavik y Christian, 2008; Rosen, 2004).

La cantidad de espuma producida aumenta con respecto a la concentración de agente tensoactivo, cuando ésta se encuentra por debajo de la concentración micelar crítica (concentración mínima de surfactante para que se formen micelas espontáneamente en una disolución). Cuanto menor sea esta concentración, mayor eficiencia tendrá el agente. Para surfactantes aniónicos, la concentración micelar crítica disminuye con el incremento de la temperatura, debido al incremento de la hidrofobicidad por la destrucción de puentes de hidrógeno entre moléculas de agua y los grupos hidrofílicos; los surfactantes iónicos presentan un comportamiento en forma de “U”, en el cual la concentración disminuye hasta un valor mínimo y aumenta después de éste (Kim y Lim, 2004; Rosen, 2004).

Por otro lado, la eficacia del surfactante como agente espumante depende de su capacidad para reducir la tensión superficial de la solución espumante; mientras menor sea ésta, mayor será el volumen de espuma formado: los surfactantes de cadena ramificada y aquellos que contienen grupos hidrofóbicos localizados en el centro producen un mayor volumen de espuma inicial debido a que estos grupos hidrofóbicos tienden a difundirse rápidamente hacia la interfase. Sin embargo, no sólo es necesario producir espuma, sino también mantenerla estable, lo cual requiere la formación de una película en la interfase con suficiente cohesión para impartir elasticidad y resistencia mecánica a la lamela que rodea las burbujas de gas. Debido a que la cohesión intercatenaria aumenta con respecto a la longitud de los grupos hidrófobos de la molécula, un tensoactivo de cadena corta será de cohesión insuficiente, mientras que una longitud excesiva produce demasiada rigidez y por lo tanto, películas muy elásticas (Rosen, 2004).

Mecanismos de desestabilización

La inestabilidad inherente de las espumas es debido a la alta energía libre de la interfase gas/líquido, lo cual constituye la fuerza motriz termodinámica para la reducción del área total de la interfase a través de procesos combinados de coalescencia y desproporción de burbujas. La estructura de las espumas se considera metaestable, por lo cual el colapso de la estructura es accionado por el principio termodinámico de un mínimo de energía de superficie, el cual se logra por una frontera

plana entre ambas fases; es decir, cuando ya no existen burbujas. En las espumas, este colapso tiene lugar tarde o temprano (Dickinson, 2010; Zabler, 2014).

Cuando las espumas formadas son dejadas al aire libre, éstas pueden ser destruidas debido a la evaporación de la fase líquida. Las monocapas de superficie pueden afectar las tasas de evaporación, y se sabe que las monocapas muy compactas, pueden reducir significativamente la evaporación del agua (Rio *et al.*, 2014).

Las espumas están sometidas a tres mecanismos principales de inestabilidad:

- 1) Maduración de Ostwald
- 2) Drenado del líquido de (y a través de) la capa de espuma.
- 3) Coalescencia

Estos efectos son, en cierto grado, interdependientes: el drenado puede promover la coalescencia, mientras que la maduración de Ostwald, o la coalescencia pueden afectar a la velocidad de drenado (Fennema, 2000).

Maduración de Ostwald

Es la difusión de gas desde las burbujas más pequeñas a las mayores (o a la atmósfera), provocando desproporción en el tamaño de burbuja. Con frecuencia, es el mecanismo más importante de desestabilización. Minutos después de su formación, puede observarse que las burbujas de gas en la espuma se tornan más grandes. En la mayoría de las espumas, las burbujas con diámetros mayores a 1 mm tienden a desaparecer rápidamente. Este fenómeno es más rápido en la parte superior de la capa de espuma, porque el aire puede difundir directamente a la atmósfera, y la capa de agua que separa las burbujas de la atmósfera es muy fina. La fuerza impulsora para la maduración de Ostwald resulta de la alta presión de gas en las burbujas de menor tamaño debido a la alta diferencia de presión de Laplace sobre la superficie curva de una burbuja. Como resultado de la alta presión en las burbujas de menor tamaño, la solubilidad del gas aumenta. Cuando dos burbujas de diferentes tamaños se separan, el gas se difunde de la más pequeña a la más grande, dando como resultado la configuración del gradiente de concentración por la diferencia de la presión de gas entre burbujas. Como resultado, la burbuja de menor tamaño se hace más pequeña y la más grande aumenta de tamaño, hasta que la burbuja pequeña desaparece. La

solubilidad y coeficiente de difusión del gas en la fase líquida resulta de gran importancia en el desarrollo de este fenómeno (Fennema, 2000; Huppertz, 2010; Marinova *et al.*, 2009)

Algunas proteínas forman capas muy tenaces en la interfase aire/agua, porque entre las moléculas adsorbidas se producen reacciones de entrecruzamiento. Durante la formación de la espuma se produce una intensa desnaturalización superficial, que conduce a agregados proteínicos bastante grandes. Estos agregados permanecen irreversiblemente adsorbidos, proporcionando gran resistencia frente a la maduración de Ostwald. La maduración se puede llevar a cabo de manera más lenta si la tensión superficial es baja, y puede detenerse si se asegura una distribución uniforme del tamaño de burbuja, así como también inmovilizando la superficie de la burbuja con una capa compacta de partículas sólidas en la interfase aire-agua. Otro método consiste en conferir a la fase continua un límite elástico mayor, por medio de un agente gelificante (Fennema, 2000; Zabler, 2014).

Drenado

El drenado se define como el flujo de líquido a través de los espacios intersticiales entre las burbujas. El flujo es impulsado por capilaridad y por la acción de la gravedad. Estos espacios intersticiales pueden ser:

- i) Lamelas, formadas entre dos burbujas adyacentes y delimitadas por burbujas de cara casi plana,
- ii) Canales (o bordes de Plateau), donde se encuentran tres lamelas (Figura 1.5), y
- iii) Nodos (vértices o uniones), donde se unen cuatro canales (Koehler *et al.*, 2000).

Las burbujas de gas inicialmente son esféricas, y están separadas por la fase continua. El drenado del líquido en estas espumas se describe de arriba hacia abajo, es decir, formación de un cremado de burbujas de aire como resultado de la diferencia de densidades entre las burbujas y la fase continua.

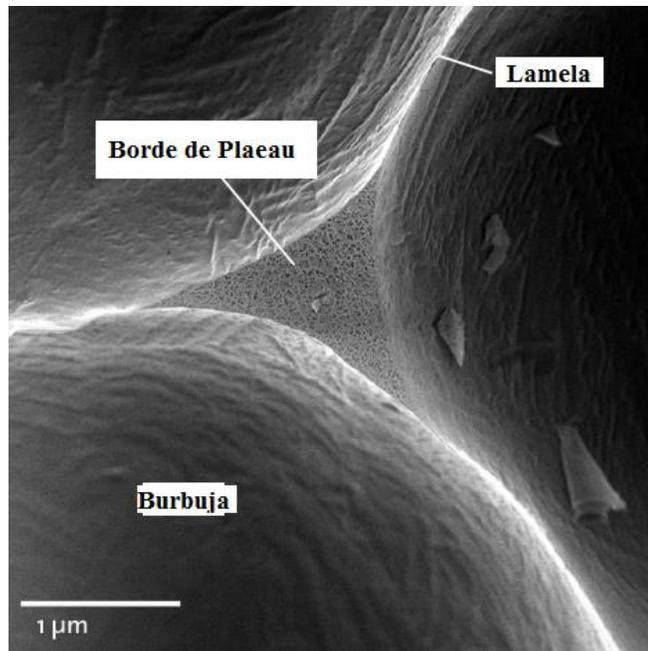


Figura 1.5 Representación esquemática de los espacios intersticiales entre las burbujas de aire en una espuma (Graphene Limited, 2016).

Al mismo tiempo, la fase continua de la espuma se somete a un movimiento descendente; cuando la fracción volumen de líquido en la espuma cae por debajo de aproximadamente 30%, las burbujas entran en contacto y las fuerzas de empuje causan la deformación de éstas, alcanzando entonces una forma poliédrica (Figura 1.6), similar a un panal de abejas. Finalmente, cuando el drenado continúa, las lamelas que separan las burbujas se adelgazan y se rompen (Huppertz, 2010; Rio *et al.*, 2014). Para prevenir la inestabilidad inducida por el drenado, es necesario frenar el movimiento ascendente de las burbujas. El aumento de la viscosidad de la fase continua no prevendrá el drenado, pero puede reducir la velocidad del mismo considerablemente (Huppertz, 2010).

Coalescencia

Cuando se ha completado el drenado, y se ha alcanzado el equilibrio de la fracción volumen del líquido, las lamelas entre las burbujas se adelgazan y pueden romperse, dando lugar a la coalescencia. La coalescencia de las burbujas de gas disminuye el número de burbujas en la espuma e incrementa el tamaño de las que permanecen.

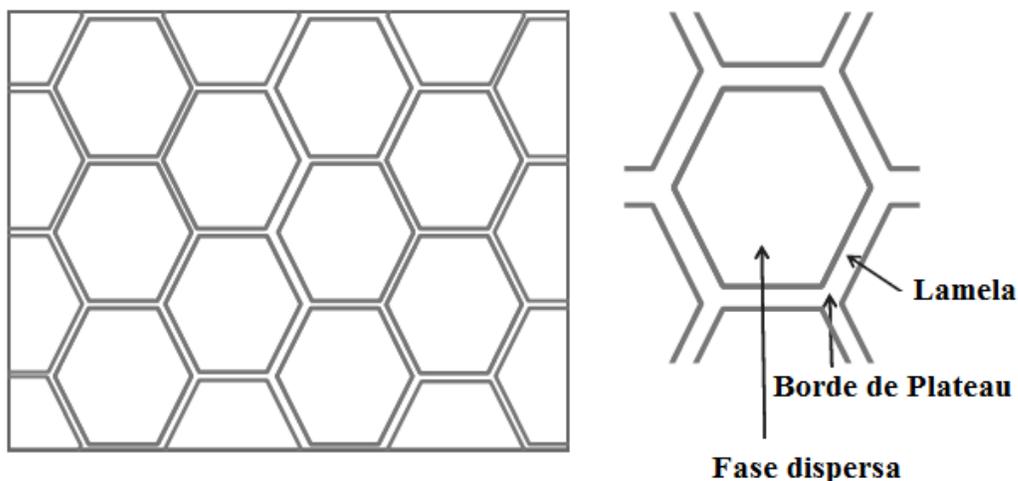


Figura 1.6 Esquematación de una espuma poliédrica (izquierda) y la ubicación de la lamela y los bordes de Plateau en dicha espuma (derecha) (Huppertz, 2010).

Este proceso se inicia mediante la formación de un pequeño agujero en la película delgada existente entre un par de burbujas en estrecha proximidad. La presión de Laplace hace que el par de burbujas fluyan juntas rápidamente. La probabilidad de la formación de un agujero de este tipo aumenta con el tiempo que ha existido esta película. Para que la coalescencia sea posible, las burbujas deben permanecer juntas por un tiempo, ya sea estando en una capa de cremado o en una espuma envejecida. Otro factor que conlleva a la coalescencia es la presencia de partículas extrañas en la película, en especial los lípidos, no así las partículas hidrófilas, que pueden adsorberse sin inducir la rotura de la película (Dickinson, 2005; Fennema, 2000; Huppertz, 2010).

1.2. Biopolímeros empleados en espumas

El término biopolímero usualmente describe a polímeros producidos de manera natural por organismos vivos. Sus estructuras moleculares base están compuestas por unidades repetidas de sacáridos, ácidos nucleicos o aminoácidos, y ocasionalmente cadenas laterales adicionales que contribuyen también a sus propiedades funcionales (Chassenieux *et al.*, 2013). En la industria alimentaria, los biopolímeros juegan un papel principal en el procesamiento y la modificación de la textura y propiedades del alimento, debido a su capacidad de interactuar con otros componentes del mismo, principalmente con el agua.

Los dos principales tipos de biopolímeros utilizados en la industria alimenticia son las proteínas y los polisacáridos, los cuales pueden presentarse puramente como macromoléculas o como parte específica de estructuras con propiedades supramoleculares. Los polisacáridos son macromoléculas formadas por 10 o más unidades de monosacáridos, unidos entre sí por enlaces glucosídicos (Badui, 2006); por su parte, las proteínas son macromoléculas cuya unidad estructural son los α -aminoácidos, los cuales se encuentran unidos entre sí por enlaces peptídicos (Fennema, 2000). Las aplicaciones que presentan en los alimentos incluyen su uso como agentes espesantes y gelificantes, principalmente, así como también otras aplicaciones derivadas de su capacidad para formar distintas microestructuras o afectar la evolución de estas, tal como la capacidad de emulsificar y estabilizar sistemas (Nicolletti-Telis, 2012).

La mayoría de las proteínas en los alimentos son capaces de adsorberse fácilmente en interfases aire/agua, debido a la combinación de actividad superficial y capacidad de formar películas viscoelásticas, permitiendo la estabilización estérica de los sistemas donde se encuentran; por su parte, los polisacáridos aportan estabilidad a los sistemas mediante el control de la reología de la fase acuosa o el aumento del espesor de la película viscoelástica formada (Dickinson e Izgi, 1996). Narchi *et al.* (2009) demostraron que en espumas a base de aislado de proteínas de suero lácteo y caseinato de sodio en mezcla con goma guar, pectina y goma xantana, las proteínas son las que gobiernan los cambios sobre la tensión superficial, mientras que los polisacáridos exhiben una fuerte influencia sobre las propiedades reológicas de la fase acuosa, por lo que, la modificación de las propiedades reológicas del sistema presentarán mayor impacto en la formación de espumas estables.

El comportamiento reológico de un sistema disperso, tal como las emulsiones o las espumas, dependerá principalmente del tamaño de las partículas suspendidas en éste. Las macromoléculas son los principales componentes estructurales de un sistema alimenticio, y su naturaleza puede afectar las fuerzas de interacción entre los componentes. Estas interacciones pueden ocurrir por medio de enlaces químicos, interacciones físicas como fuerzas de Van Der Waals, fuerzas electrostáticas e interacciones líquido-sólido, y determinan el comportamiento estructural de los

alimentos a condiciones estáticas y de baja velocidad de cizalla. A altas velocidades de cizalla, los esfuerzos de cizalla y de elongación pueden vencer las fuerzas de la estructura, modificándola, tal y como muestra la Figura 1.7 (Nicolleti-Telis, 2012).

Normalmente, las soluciones de moléculas de bajo peso molecular o a bajas concentraciones molares se consideran newtonianas, lo cual indica que su viscosidad es constante e independiente de la velocidad de cizalla aplicada; esta ley aplica también a suspensiones de macromoléculas a bajas concentraciones y bajas velocidades de cizalla. No obstante, si la velocidad de cizalla aumenta, la viscosidad de la suspensión cambiará rápidamente, manifestando un comportamiento no newtoniano (Nicolleti-Telis., 2012).

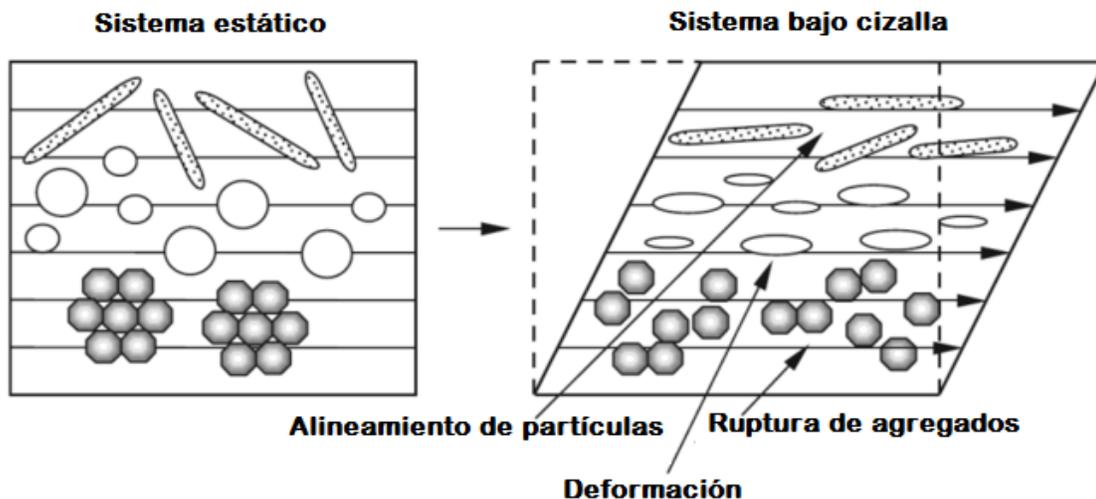


Figura 1.7. Efectos del cizallamiento en los componentes dispersos en sistemas multifase (Nicolleti-Telis, 2012).

A concentraciones suficientemente altas de polímeros, la mayoría de los biopolímeros fluidificantes a la cizalla exhiben tres etapas de respuesta viscosa cuando es cizallado durante un intervalo amplio de velocidad de cizalla (Figura 1.8). A bajas velocidades de cizalla, muestran propiedades de un fluido newtoniano, con una viscosidad constante (η_0) a bajas velocidades de cizalla (1); a continuación, se presenta una disminución de la viscosidad en función a la velocidad de cizalla de acuerdo a una función potencia (2), donde el inverso de la velocidad de cizalla en la cual ocurre la

transición de comportamiento newtoniano a fluidificante, representa el tiempo característico (λ), y finalmente, una viscosidad constante (η_∞) a altas velocidades de cizalla (3). Las tres regiones pueden deberse al reordenamiento en la conformación de las moléculas de los biopolímeros en la dispersión debido al cizallamiento. En la primera etapa, cuando la velocidad de cizalla aplicada es baja, existe un pequeño reordenamiento de las cadenas del polímero, mientras que en la etapa 2, las cadenas experimentan un reordenamiento gradual. En la etapa 3, la velocidad de cizalla es lo suficientemente alta como para que las cadenas del polímero no experimenten un mayor reordenamiento (Rao, 2007).

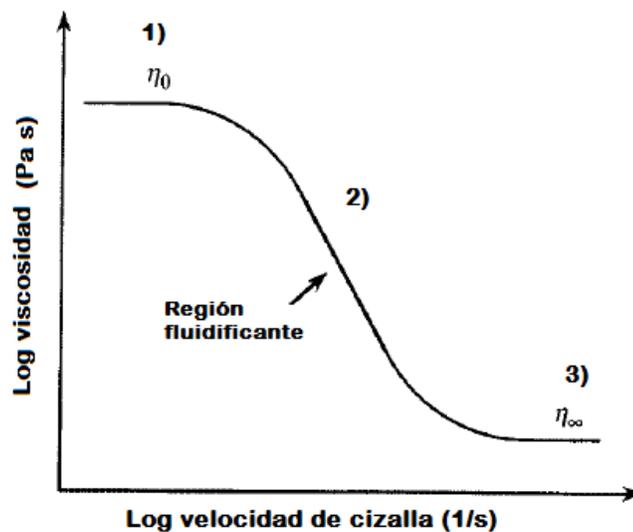


Figura 1.8. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla para sistemas alimenticios fluidificantes a la cizalla con tres etapas de respuesta viscosa (Rao, 2007).

La viscosidad (η) de las disoluciones puede correlacionarse con la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) por medio de la ecuación establecida por Yasuda, mediante la modificación del modelo de Carreau, obteniendo el modelo de Carreau-Yasuda (Ec. 1.1) :

$$\eta = \eta_\infty \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{[1 + (\lambda \dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}}} \quad (1.1)$$

Donde η_0 representa la viscosidad constante a bajas velocidades de cizalla (Pa s), η_∞ es la viscosidad constante a altas velocidades de cizalla (Pa s), λ representa el tiempo característico (s), el tiempo constante relacionado con el tiempo de relajación del polímero en disolución, n es el índice de comportamiento al flujo (adimensional), también llamado índice de la potencia, y a es un parámetro adimensional que describe la región de transición entre la zona de viscosidad a bajas velocidades de cizalla y la zona de comportamiento acorde a la ley de la potencia (Yasuda, 2006).

Concentrado de proteínas de suero lácteo

Las proteínas tienen la capacidad de formar espumas, esta característica depende de la facilidad de establecer una película en la interfase cohesiva a una concentración muy baja y que sea capaz de atrapar y retener el aire, así como de soportar esfuerzos mecánicos. En este fenómeno influyen muchos factores que al modificar las proteínas alteran la capacidad de espumado: pH, sales, azúcares, lípidos y temperaturas elevadas, entre otros (Badui, 2006).

Entre las proteínas de mayor aplicación en la industria de los alimentos, se encuentran las de origen lácteo, éstas pueden clasificarse en dos grupos de acuerdo a su estructura:

- Flexibles, como las caseínas y caseinatos
- y globulares, como las proteínas de suero lácteo.

De acuerdo a esta estructura podrán desarrollar diferentes propiedades funcionales (Marinova *et al.*, 2009). Las proteínas de suero lácteo son una mezcla de proteínas con diversas propiedades funcionales y por lo tanto, varios usos potenciales. Las principales proteínas son la β -globulina y la α -lactoalbúmina, que representan aproximadamente el 70% de las proteínas en el suero y son responsables de las propiedades funcionales. Las otras proteínas presentes en el concentrado de suero lácteo son las inmunoglobulinas (13%), la albúmina sérica bovina (5%) y la lactoferrina (3%) (Damodaran y Paraf, 1997).

Los concentrados de proteína de suero lácteo son obtenidos por la ultrafiltración del suero resultante de la elaboración de productos lácteos, por medio de una membrana semipermeable, la cual selectivamente permite pasar materiales de bajo peso

molecular como agua, iones y lactosa, mientras retiene materiales de peso molecular alto como la proteína. El retenido es así concentrado por evaporación y liofilizado (Parra-Huertas, 2009).

La β -globulina es una proteína globular de la familia de las lipocalinas; las cuales se caracterizan por su capacidad de unirse a moléculas pequeñas hidrofílicas (Flower, 1996). Tiene una masa molecular de 18.3 kDa. Contiene 162 residuos de aminoácidos, incluyendo una proporción relativamente alta de aminoácidos de cadena ramificada. Contiene residuos de leucina, isoleucina y valina por lo que es una fuente rica de estos aminoácidos, y estos restos le proporcionan algunas regiones fuertemente hidrofóbicas (Phillips y Williams, 2011).

Tiene una estructura globular que incluye siete principales cadenas de estructura beta plegada y forma un "cáliz" o copa (Figura 1.9). La cavidad formada en la proteína puede ser el sitio de unión para una gama de compuestos de bajo peso molecular, incluyendo ácidos grasos y retinol, y se pueden unir compuestos saborizantes hidrófobos, lo que puede provocar defectos de sabor (Phillips y Williams, 2011).

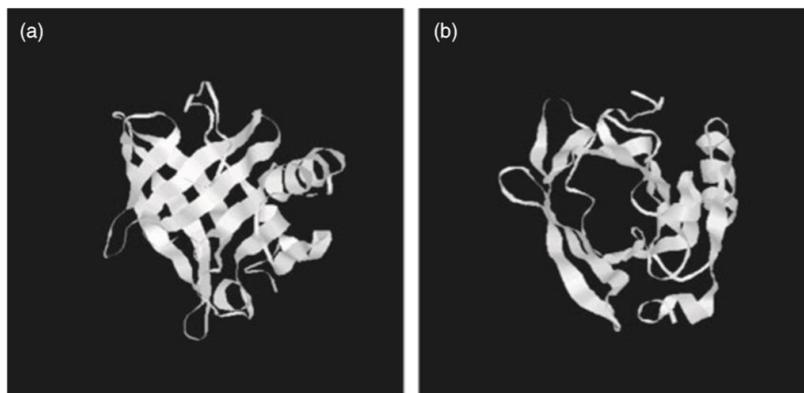


Figura 1.9 Estructura de la β -globulina, a) mostrando una amplia estructura de lámina plegada paralela, con hélice alfa a la derecha, y b) mirando a través del cáliz (Phillips y Williams, 2011).

La proteína se produce normalmente como un dímero no covalente ligado a pH neutro, pero se separa en monómeros a pH bajo. Una característica significativa de la β -lactoglobulina es la química del azufre de esta proteína: además de dos puentes disulfuro internos que estabilizan la proteína, hay un solo grupo sulfhidrilo en Cys 121

que está enterrado en la proteína, protegido por la hélice alfa. Si se expone como resultado del calentamiento u otra alteración de la estructura secundaria y terciaria de la misma, éste puede reaccionar con otros grupos sulfhidrilo, lo que conduciría a intercambios disulfuro y reacciones de entrelazamiento con otras moléculas de β -lactoglobulina u otras proteínas, dependiendo del entorno (Phillips y Williams, 2011). Esta química del azufre es clave para muchas de las propiedades funcionales de la β -lactoglobulina, pues el intercambio disulfuro impide la renaturalización de la proteína desplegada, dando lugar a nuevas estructuras. La alta proporción de residuos hidrófobos en la proteína también es importante: cuando la extensa estructura laminar beta se descompone, las secuencias hidrófobas deben reacomodarse para formar nuevas estructuras que estabilizan los grupos hidrófobos en solución acuosa (Phillips y Williams, 2011).

La α -lactoalbúmina es una pequeña proteína con un peso molecular de 1.42 kDa que forma parte de la enzima lactosa sintetasa. La cantidad de lactosa en la leche se ha encontrado que se correlaciona directamente con la cantidad de α -lactoalbúmina, la estructura está bien estabilizada por puentes disulfuro, lo que significa que por sí sola puede desplegarse cuando se calienta y replegarse de forma similar a su forma nativa. En presencia de otras proteínas reactivas, tales como β -lactoglobulina, forma enlaces cruzados, lo cual la inestabiliza (Phillips y Williams, 2011).

Las inmunoglobulinas en la leche de vaca son una mezcla de inmunoglobulinas de la sangre y fabricadas en la glándula mamaria. La estructura de la lactoglobulina comprende dos cadenas pesadas y dos ligeras, cada par ligero-pesado se encuentra reticulado por puentes disulfuro. Son proteínas globulares y termolábiles (Phillips y Williams, 2011).

La albúmina sérica bovina se encuentra en la leche y en las proteínas de suero de leche en cantidades variables. Se produce como resultado de la fuga de las proteínas de suero de la sangre hacia la leche en las uniones estrechas en las células en la glándula mamaria. Se puede considerar como un componente menor de alto peso molecular (por lo tanto, bien conservado en el procesamiento de membrana), con un gran número de puentes disulfuro y capaz de reaccionar con β -lactoglobulina y capaz de unirse a una gama de materiales de bajo peso molecular (Phillips y Williams, 2011).

Dos proteínas de suero de leche de menor importancia son la lactoferrina y lactoperoxidasa. La lactoferrina se considera importante porque se produce a niveles mucho más altos en la leche humana, y debido a que tiene propiedades antibacterianas. También se ha reportado para estimular los procesos de crecimiento de los huesos en un sistema fuera de un organismo (*ex vivo*), a pesar de desconocerse como podría funcionar dentro del organismo (*in vivo*). La lactoperoxidasa es parte de un sistema que tiene actividad antibacteriana. Estas dos proteínas están presentes en niveles muy bajos en los ingredientes de proteína de suero de leche, pero están disponibles en preparaciones especiales de los proveedores (Phillips y Williams, 2011).

Las proteínas del suero en sistemas modelo forman espumas con buenas propiedades en concentraciones alrededor de un 15%. La presencia de CaCl_2 mejora las propiedades espumantes de las proteínas de suero. En presencia de sacarosa, las espumas disminuyen su resistencia a la deformación elástica y al drenado debido a la disminución de propiedades de superficie de las proteínas (Phillips y Williams, 2011).

La adsorción y propagación de las proteínas de suero lácteo es muy lenta en la interfase y crea partículas de tamaño pequeño. Debido a que la tensión superficial de interfases aire/agua (73 mN/m) es mucho mayor que las formadas por aceite/agua (20-40 mN/m), las proteínas se encuentran mayormente desnaturalizadas en interfases aire/agua (Damodaran y Paraf, 1997).

La capacidad espumante de las proteínas de suero depende del método de preparación. La eliminación de partículas insolubles y depresores, tales como lipoproteínas por centrifugación o filtración incrementa el rendimiento volumétrico de soluciones de proteínas de suero (Damodaran y Paraf, 1997).

Goma xantana

La goma xantana es un heteropolisacárido aniónico de alto peso molecular producido por la bacteria *Xanthomonas campestris* con una estructura primaria que consiste en unidades repetidas de pentasacáridos (Figura 1.10) formados por dos unidades de D-glucosa, dos unidades de D-manosa y una de D-ácido glucurónico. A la D-manosa se le unen acetato y piruvato en cantidades no estequiométricas. Su cadena principal está

compuesta de unidades de β -D-glucosa con enlaces 1-4 (García-Ochoa *et al.*,2000; Matyjaszewski y Möller, 2012).

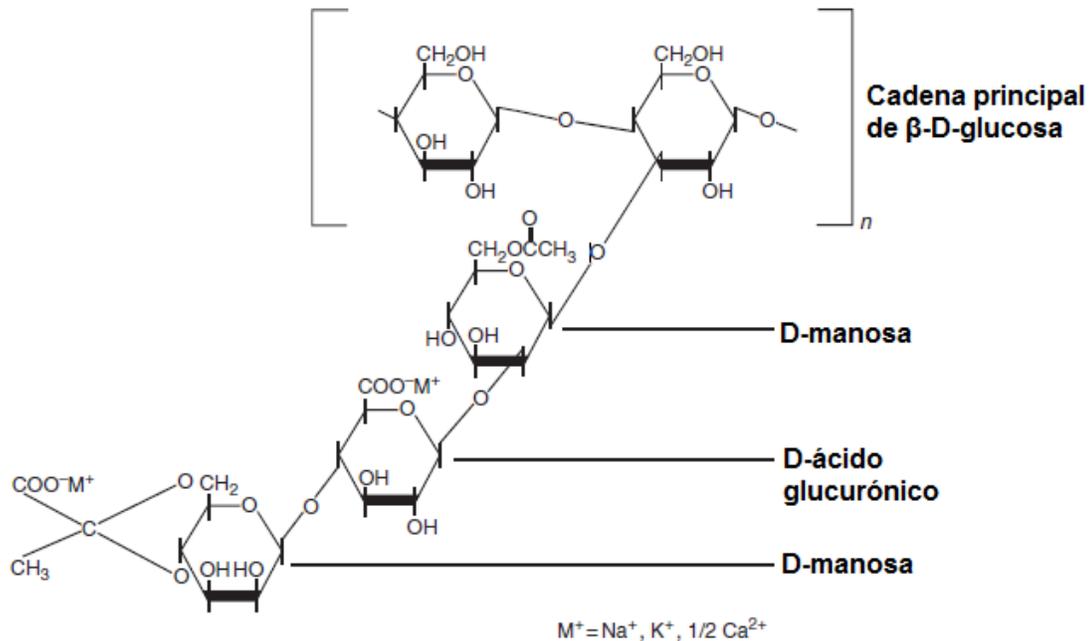


Figura 1.10. Unidad de pentasacáridos que componen a la goma xantana y sitios para la union de cationes (M^+) (Matyjaszewski y Möller, 2012).

Muchos autores apoyan el modelo nativo de hélice doble de la xantana, estabilizada por enlaces no covalentes. Los cambios de temperatura y/o la fuerza iónica inducen una transición conformacional reversible de la estructura secundaria de una forma ordenada a otra desordenada, lo que resulta en la separación de las hebras de xantana. Por otra parte, los resultados publicados de las mediciones de peso molecular de la goma xantana varían fuertemente con el método aplicado, éste oscila entre 7000–7740 de kDa (Matyjaszewski y Möller, 2012).

La goma xantana es soluble en agua caliente y fría, pero insoluble en la mayoría de los disolventes orgánicos. Su importancia industrial se basa en su capacidad para controlar la reología de los sistemas a base de agua. La combinación única de propiedades valiosas de la goma xantana en comparación con otros hidrocoloides se resume de la siguiente manera (Matyjaszewski y Möller, 2012):

- viscosidades altas a bajas concentraciones,
- altamente fluidificante en un intervalo de cizalla amplio,
- buena estabilidad térmica (4-80 °C),
- buena estabilidad a lo largo de un espectro de pH amplio (2-12),
- resistentes a la degradación por la mayoría de las enzimas,
- soluble y estable en soluciones salinas.

El alto grado de viscosidad de la goma xantana a concentraciones bajas la hace un espesante y estabilizador. Las disoluciones de goma xantana son altamente fluidificantes, más que la mayoría de las preparadas con hidrocoloides comunes, como se muestra en la Figura 1.11 (Phillips y Williams, 2009).

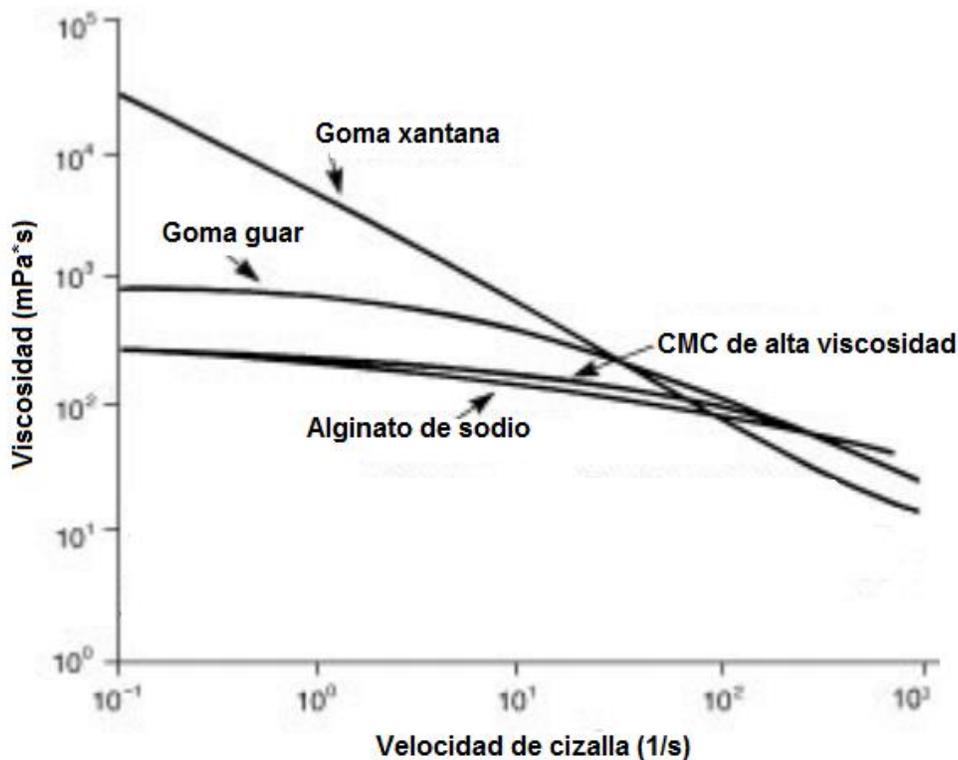


Figura 1.11. Comparación del comportamiento al flujo de goma xantana con respecto a otros hidrocoloides a concentración del 0.5% (Phillips y Williams, 2009).

Cuando la velocidad de cizalla aumenta, su viscosidad disminuye progresivamente, pero al retirar el cizallamiento, la viscosidad inicial se recupera de manera casi

instantánea. Este comportamiento es resultado de la habilidad de las moléculas de goma xantana para formar, en solución, agregados intermoleculares a través de puentes de hidrógeno y entrelazamiento de polímeros. Esta red altamente ordenada de moléculas rígidas y entrelazadas permite altas viscosidades a bajas velocidades de cizalla. Estos agregados se rompen progresivamente bajo la influencia de la cizalla aplicada, por lo tanto, las características de flujo de las disoluciones de goma xantana son altamente fluidificantes (Phillips y Williams, 2009).

Las disoluciones de goma xantana mantienen su viscosidad a valores de pH de entre 2 y 12; a temperaturas superiores a 40 °C, causan una disminución de la viscosidad en condiciones muy ácidas o alcalinas durante el almacenamiento. A condiciones de pH intermedias, la xantana en disolución mantiene su viscosidad a temperaturas de hasta 70-80 °C (Matyjaszewski y Möller, 2012).

La inclusión de goma xantana a concentraciones relativamente bajas (0.05-0.15%) en la formación de espumas permite la obtención de sistemas de mayor estabilidad. Estudios realizados por Liszka-Skozylas *et al.* (2014) en espumas a base de concentrado de proteínas de suero lácteo, demostraron que la inclusión de goma xantana aumentó la viscosidad de ésta, retrasando el colapso de las espumas, así como también un aumento de la densidad de éstas. Por su parte, Martínez-Padilla *et al.* (2015) demostró, que el aumento de la concentración de goma xantana en los sistemas evaluados aumentó la estabilidad de éstos, al retardar la maduración de Ostwald y el drenado en las espumas, debido también al efecto del polisacárido sobre la reología de la fase continua, con efectos poco significativos sobre el rendimiento volumétrico obtenido. En ambos estudios se apreció un efecto sinérgico entre los biopolímeros utilizados, debido a la incompatibilidad termodinámica, lo cual se apreció como un aumento en la viscosidad de la disolución espumante.

Fructanos de agave

Los fructanos son un grupo de oligosacáridos y polisacáridos con residuos de β -fructofuranosil. Muchos hongos, bacterias y plantas sintetizan estas moléculas. En las plantas, los fructanos se acumulan en la vacuola, pero también son encontrados en el floema, y sirven como carbohidratos de almacenamiento, así como también intervienen

en la tolerancia al frío y a la sequía (López y Mancilla-Margalli, 2006; Alvarado *et al.*, 2014). Basados en el enlace glicosídico entre sus unidades de fructosa, los fructanos pueden dividirse en:

- Inulinas, con enlaces β 2 \rightarrow 1;
- Levanos, con enlaces β 2 \rightarrow 6;
- Graminan, con ambos tipos de enlaces (Vereyken *et al.*, 2003).

Otra forma de clasificarlos es por la longitud de sus cadenas: cadenas largas (grados de polimerización mayores a 10) y cortas (con grados de polimerización de 3 a 10) comúnmente nombrados como fructoligosacáridos (FOS) (Alvarado *et al.*, 2014).

Una fuente natural rica en fructanos son las plantas de agave, abundantes en las regiones áridas de Latinoamérica. La producción de oligofructanos o jarabe de agave es llevado a cabo por medio de hidrólisis de fructanos. El *Agave tequilana* Weber var. Azul es el más utilizado para la producción de jarabe y fructanos. En esta planta se acumulan entre 13% y 17% p/p de fructanos en plantas maduras, similar a la proporción de inulina en achicoria (Rodríguez Furlán *et al.*, 2014). Más de 80% en peso del contenido de carbohidratos en agave azul se origina de fructanos. Estos fructanos son erróneamente conocidos, comercialmente, como inulina ya que esa denominación implica que el polisacárido es un fructano lineal (Toriz *et al.*, 2007).

Los fructanos de agave tienen un grado estimado de polimerización (DP) de entre 3 a 30 unidades; su estructura molecular resulta una mezcla compleja de fructanos lineales tipo inulina con enlaces β (2 \rightarrow 1), y ramificados: levanos con enlaces (2 \rightarrow 6) y neofructanos que consisten en una sacarosa central con enlaces a cadenas de fructofuranosil con enlaces (2 \rightarrow 1) y β (2 \rightarrow 6); estas unidades estructurales se esquematizan en la Figura 1.12. Cada uno cuenta con casi un solo residuo α -D-Glcp en una posición terminal o interna (Praznik *et al.*, 2013; Arrizon *et al.*, 2010; Alvarado *et al.*, 2014).

Toriz *et al.* (2007), propusieron una estructura química para los fructanos de agave azul con base en los resultados combinados obtenidos por cromatografía de exclusión de tamaños/dispersión de luz y análisis de resonancia nuclear magnética (Figura 1.13).

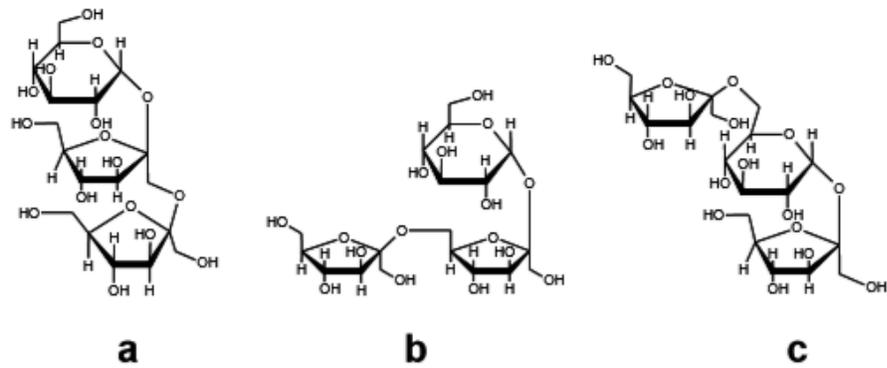


Figura 1.12 Unidades estructurales de fructanos de agave a) 1-kestosa (fructanos tipo inulina), b) 6-kestosa (fructanos tipo levan) y neokestosa (Toriz *et al.*, 2007).

Los fructanos tienen una alta solubilidad, lo cual podría indicar que sus grupos hidroxilo están disponibles para interactuar con las moléculas de agua circundantes y cabezas de grupos fosfolípidos. Esta unilateralidad en cuanto a los restos hidroxilo e hidrógeno puede ser responsable de la alta afinidad interfacial (Demel *et al.*, 1998).

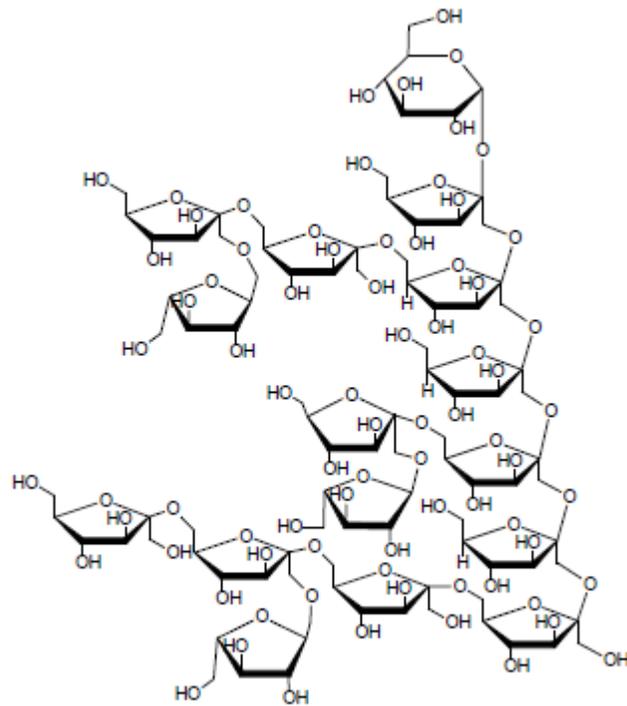


Figura 1.13. Estructura química propuesta para los fructanos de *Agave azul* (*Tequilana Weber* var. *Azul*) (Toriz *et al.*, 2007).

Los posibles beneficios de los fructanos tipo inulina para la salud humana han sido estudiados desde hace más de una década. Se trata de una fibra alimentaria soluble que no puede ser digerida por los seres humanos. Tiene cualidades prebióticas, ya que es preferentemente fermentado por bacterias intestinales benéficas. Los fructanos son considerados como alimentos funcionales, es decir, alimentos (sustancias) con efectos benéficos en la salud (Ritsema y Smeekens, 2003).

Los fructanos probablemente promueven la salud de diversas maneras: Fomentan el crecimiento *Lactobacillus* y *bifidobacterias* en el intestino, alterando así la flora bacteriana de los intestinos de tal manera que las bacterias patógenas se vuelven menos abundantes. También promueven la resorción del calcio y por lo tanto podría ser útil en la prevención de la osteoporosis. Además, las concentraciones de insulina, colesterol, triglicéridos y fosfolípidos se reducen en el suero sanguíneo como resultado de una dieta alta en fructanos (Ritsema y Smeekens, 2003). Se ha demostrado también que los fructanos de cadena corta son responsables de la absorción mineral, vinculada a la reducción del pH del colon, el efecto bifidogénico y la producción de ácidos grasos de cadena corta (Alvarado *et al.*, 2014).

La aplicación de fructanos de agave en sistemas alimenticios no ha sido suficientemente estudiada. Estudios realizados por Crispín-Isidro *et al.*, (2015) en yogurt batido bajo en grasa demostraron la capacidad de los fructanos como un posible estabilizante de geles lácteos debido a la interacción de éstos con las caseínas presentes en el yogurt; los fructanos tendieron a depositarse en la superficie de las proteínas, reforzando la red tridimensional formada por éstas y por lo tanto, volviendola más resistente frente a esfuerzos mecánicos; este efecto aumentó con respecto a la concentración de fructanos presentes, obteniéndose entonces un yogurt estable y con propiedades texturales deseables. El efecto sinérgico entre ambos biopolímeros fue confirmado también por Sosa-Herrera *et al.* (2016), ahora en un medio acuoso, resultando en el aumento de la viscosidad de las dispersiones, así como la disminución de la tensión superficial en la interfase líquido-gas en comparación con dispersiones de ambos biopolímeros de manera individual. Por sus propiedades de interfase, es posible que el caseinato de sodio se adsorbiera primero en la interfase, formando una capa primaria de mayor densidad, mientras que las moléculas de fructano formaran

una segunda capa mas difusa sobre ésta. Lo anterior sugiere la formación de interfases liquido-gas de mayor grosor y por lo tanto, mayormente estables.

2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Objetivos

Objetivo general

Evaluar el efecto de fructanos de agave sobre las propiedades espumantes de concentrado de proteínas de suero lácteo en mezcla con goma xantana, mediante la caracterización del sistema acuoso y la estabilidad del sistema disperso formado delimitando su funcionalidad técnica.

Objetivo particulares

- Determinar el efecto de la concentración de fructanos de agave sobre la densidad relativa, el pH y el comportamiento al flujo de los sistemas acuosos que conformarán las espumas a base de concentrado de proteínas de suero lácteo, estableciendo su relación con las propiedades espumantes.
- Determinar el efecto de la concentración de fructanos de agave sobre las espumas formadas cuantificando la densidad relativa, el volumen de espuma desarrollado y la estabilidad, mediante la relación entre masa a un volumen constante, relación entre el volumen inicial del líquido y volumen de la espuma formada, dos métodos ópticos y drenado gravimétrico, identificando la proporción proteína-polisacárido que permita la obtención de mayor rendimiento y estabilidad.
- Determinar el efecto de la concentración de los fructanos de agave en las espumas formadas sobre los parámetros texturales mediante pruebas de fuerza en compresión, identificando sus propiedades adhesivas, cohesivas y de consistencia.

2.2. Materiales

Se utilizaron muestras comerciales de: proteínas de suero lácteo concentradas (CLS34, 34% proteínas, 4.59% de humedad, Hegart de México S.A. de C.V., México),

fructanos de agave azul (Inulina Orgánica de Maguey, 3.29% humedad, Mielles Campos Azules S.A. de C.V., México) y goma xantana (Keltrol 521, 11.15% humedad, CPKelco, Estados Unidos). Las muestras se dispersaron en agua purificada (E-pura, pH 5, PepsiCo México, México). Se prepararon sistemas acuosos de mezclas de goma xantana (0.1%), concentrado de proteínas de suero lácteo (15%) y fructanos de agave (1, 5, 10, 15, 20 y 25%).

2.3. Métodos

2.3.1. Preparación de muestras

Los sistemas acuosos se prepararon por porcentajes masa/masa en base seca, mediante la adición y mezclado de los hidrocoloides en agua uno a uno en el siguiente orden: goma xantana, 5 minutos; fructanos de agave, 10 minutos y concentrado de proteínas de suero lácteo, 10 minutos. El mezclado se realizó bajo agitación magnética (Cimarec, Thermo Scientific, Estados Unidos) a temperatura ambiente (23 °C); los sistemas acuosos se dejaron reposar durante 24 horas a 6 °C en un refrigerador, para asegurar la completa hidratación, posterior a eso se realizó la caracterización de los sistemas acuosos. Para la formación de espumas, los sistemas acuosos (100 ml) fueron homogenizados durante un minuto a 6300 rpm utilizando un agitador de alta velocidad (L4RT, Silverson, Estados Unidos) y posteriormente batidos utilizando una batidora profesional (Kitchen Aid, K5SS, Estados Unidos) con agitador de globo de alambre por 5 minutos a 300 rpm, tras lo cual se realizó su caracterización. La preparación de las muestras se realizó a temperatura ambiente (23 °C). La temperatura de las muestras se monitoreó con ayuda de un termómetro infrarrojo (MiniTemp, Raytec, Estados Unidos).

2.3.2. Caracterización de los sistemas acuosos

pH

El pH se determinó con ayuda de un potenciómetro portátil (Waterproof pH Testr 3, Oakton, EUA). El uso del potenciómetro se basa en la medición electrométrica de la actividad de los iones hidrógeno presentes en una muestra (NMX-F-317-S-1978). La

prueba se realizó por triplicado y se calculó el promedio y la desviación estándar, así como el coeficiente de variación de los resultados obtenidos.

Densidad relativa

La densidad se determinó en un densímetro digital (DMA 500, Anton Paar, Austria) por triplicado, obteniéndose el valor de la densidad relativa de los sistemas acuosos, la cual expresa la relación de la densidad de estos con respecto a la densidad de un líquido de referencia, en este caso, el agua, a la misma temperatura. Se calculó el promedio y la desviación estándar, así como el coeficiente de variación de los resultados obtenidos expresado en porcentaje.

El funcionamiento del densímetro se basa en la medición de densidad con el tubo «U» oscilador, en el cual, una parte del tubo en U vibra a su frecuencia de resonancia natural mediante un sistema eléctrico de retroalimentación; un cambio en la densidad del fluido problema varía la frecuencia de la resonancia e induce una corriente alterna en una bobina receptora (Creus Solé, 2001).

Pruebas de flujo

Se utilizó un reómetro (Physica MCR301, Anton Paar, Austria) con geometría de cono y placa para la determinación del comportamiento al flujo de los sistemas acuosos; las pruebas se realizarán a 25 °C, se aplicó un ciclo de ascenso y descenso de velocidad de cizalla en un intervalo de 0.01 a 1000 s⁻¹, con una adquisición de 50 puntos, con una duración de 10 segundos por cada punto. Se obtuvieron datos de viscosidad y esfuerzo de cizalla con respecto a la velocidad de cizalla, con los cuales se elaboraron las curvas de flujo y se ajustaron al modelo reológico correspondiente con ayuda del software integrado del equipo. Se calcularon los parámetros reológicos correspondientes al modelo de ajuste. Las pruebas se realizaron por triplicado.

El principio básico del reómetro es la transferencia de cantidad de movimiento desde la geometría que rota hacia la placa en la que está contenida la muestra. Se mide el par de torsión o torque de motor requerido para mover la geometría y se transforma en esfuerzo de cizalla por una constante. La velocidad de rotación se transforma en velocidad de cizalla con la constante de proporcionalidad respectiva, dependiente de las dimensiones de la geometría utilizada. La viscosidad, que es una medida de la

resistencia a transferir cantidad de movimiento, se calculará a través del cociente del esfuerzo de cizalla entre la velocidad de cizalla (Martínez-Padilla, 2012).

2.3.3. Caracterización de espumas

Densidad relativa

La densidad relativa se determinó a partir de la relación entre la densidad de la espuma y la densidad del agua a las mismas condiciones, las cuales se determinaron por medio de la relación de masas a volumen y temperatura constante. Se utilizaron cajas Petri de 50 mm de diámetro; las cuales fueron llenadas de espuma al ras (Martínez-Padilla *et al.*, 2014). El llenado fue cuidadoso, revisando que no quedaran espacios vacíos dentro de la caja. La superficie fue nivelada con ayuda de una espátula. Las cajas llenas se pesaron, obteniéndose la masa de espuma m_{Agua} ; posteriormente las mismas cajas se llenaron con agua y pesadas igualmente, obteniéndose la masa del agua m_{Agua} . La densidad relativa (ρ_{rel}) está dada por la ecuación 2.1:

$$\rho_{rel} = \frac{m_{espuma}}{m_{Agua}} \quad (2.1)$$

La prueba se realizó por triplicado, calculándose promedio y desviación estándar de los valores obtenidos, así como también el porcentaje de coeficiente de variación.

Capacidad espumante

La capacidad espumante se determinó inmediatamente después del batido, por medio de la adaptación del tazón de batido, al cual se incluyó una regleta graduada, ésta se obtuvo a partir del rendimiento volumétrico expresado en términos de porcentaje relativo al volumen inicial de líquido (Badui, 2006) y se calculó usando la ecuación 2.2.

$$\text{Rendimiento volumérico (\%)} = \frac{\text{Volumen de espuma} - \text{Volumen de líquido inicial}}{\text{Volumen líquido inicial}} \times 100 \quad (2.2)$$

Dispersión-retrodispersión de la luz sobre la muestra

El seguimiento de estabilidad de las espumas en función del tiempo se realizó por medio de un analizador óptico de transmisión-retrodispersión de luz (Turbiscan MA2000, Formulacion, Francia). Los tubos de muestra del equipo fueron introducidos en la espuma recién formada, hasta alcanzar una altura de llenado de aproximadamente 6 centímetros; las muestras se escanearon en intervalos de 10 minutos (Martínez-Padilla *et al.*, 2014). La prueba se realizó por triplicado. Durante esta prueba, la muestra fue escaneada en su totalidad por una fuente de luz de infrarrojo cercano, dos detectores sincronizados cuantificaron los dos procesos físicos involucrados: transmisión (luz transmitida por la muestra) y la retrodispersión (luz retrodispersada por la muestra). El flux de luz medida depende de la longitud de onda de fotones en la muestra, y ésta a su vez, depende del diámetro de partículas y la fracción volumen, proporcionando así información sobre el estado real de la dispersión (Mengual *et al.*, 1999).

Se obtuvieron perfiles de transmisión y retrodispersión de la luz con respecto al tiempo (Figura 2.1). El drenado de líquido se identificó como picos negativos al fondo del tubo en los perfiles de retrodispersión, mientras que el colapso se identificó como los picos positivos en los perfiles de transmisión en la parte superior del tubo de vidrio.

El incremento de tamaño de burbuja debido a la maduración de Ostwald se observó como la disminución progresiva en el perfil de retrodispersión en función del tiempo en la parte media del tubo de muestra y se calculó—por medio de la cinética de valores medios.

Para el caso del drenado de líquido, se delimitó el 50% de la altura del pico de retrodispersión y la altura a la cual se encontraba la capa de drenado en el tubo de muestra, y con la cinética de espesor absoluto se obtuvieron los valores de altura de drenado en función del tiempo transcurrido. El colapso de la espuma se determinó a partir del porcentaje de transmisión de luz que incidía sobre el tubo de muestra como la disminución de la altura de la muestra dentro del tubo con respecto al tiempo transcurrido, por medio de la cinética de espesor absoluto.

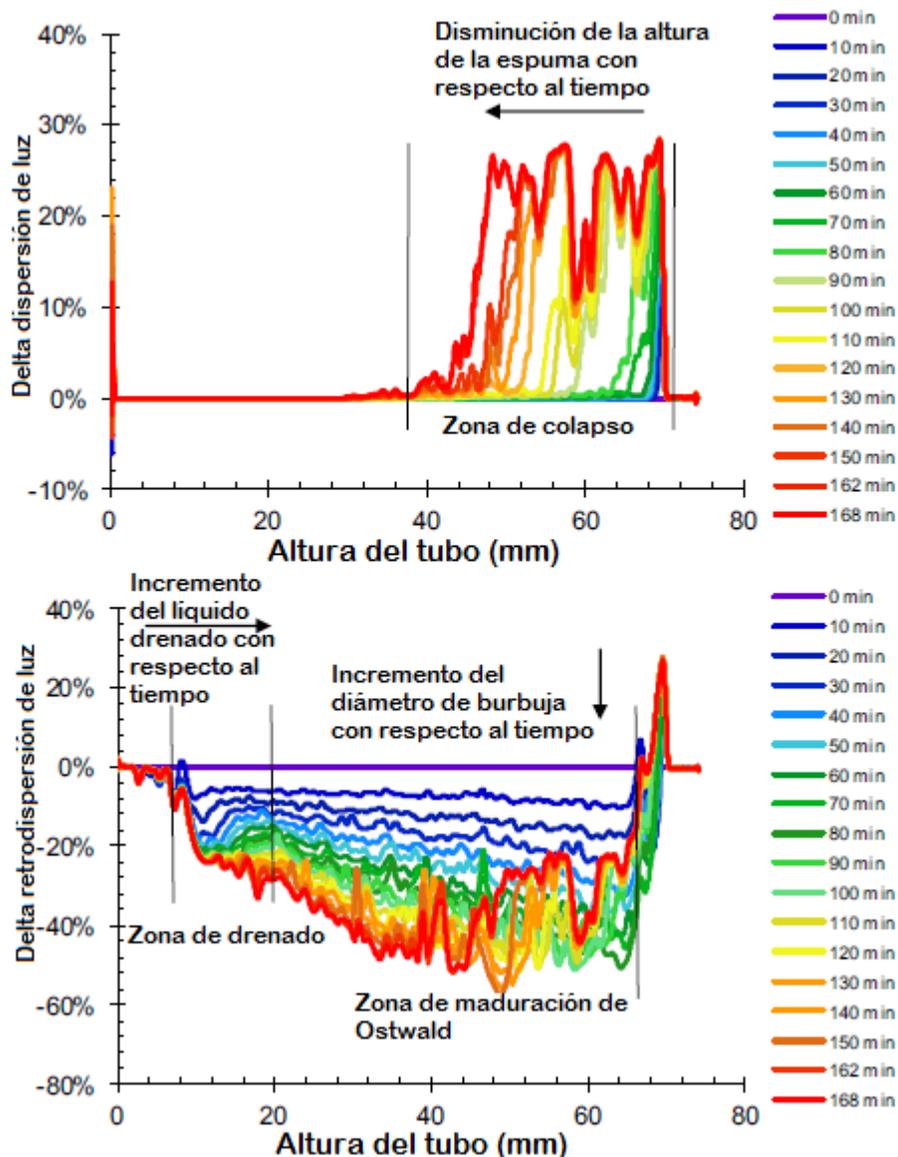


Figura 2.1. Perfiles típicos de transmisión y retrodispersión de luz en una espuma evaluada con Turbiscan MA2000 (Martínez-Padilla *et al.*, 2014).

La cinética de desestabilización se obtuvo utilizando el software Turbisoft (V1.2.1., 1998, Formulaction); los parámetros de estabilidad se calcularon exportando los datos de transmisión o retrodispersión de luz obtenidos a una hoja de cálculo (Excel 2013, Microsoft Corp.), en el cual se construyeron los respectivos gráficos en función del tiempo y realizando un ajuste. En caso de existir dependencia lineal, las velocidades de drenado, colapso e incremento de diámetro de burbuja se calcularon como la pendiente de la recta resultante. Se calculó también un promedio de tiempo estable, el

cual correspondía al tiempo máximo en el cual no se mostró inestabilidad en el sistema a lo largo de su evaluación.

Drenado gravimétrico

Adicionalmente, se realizó el seguimiento de la estabilidad de las espumas frente a la acción de la fuerza de gravedad, por medio del uso de copas de estabilidad, las cuales fueron un vaso de precipitados de 150 ml acoplado a una probeta de 10 ml, como la mostrada en la Figura 2.2.

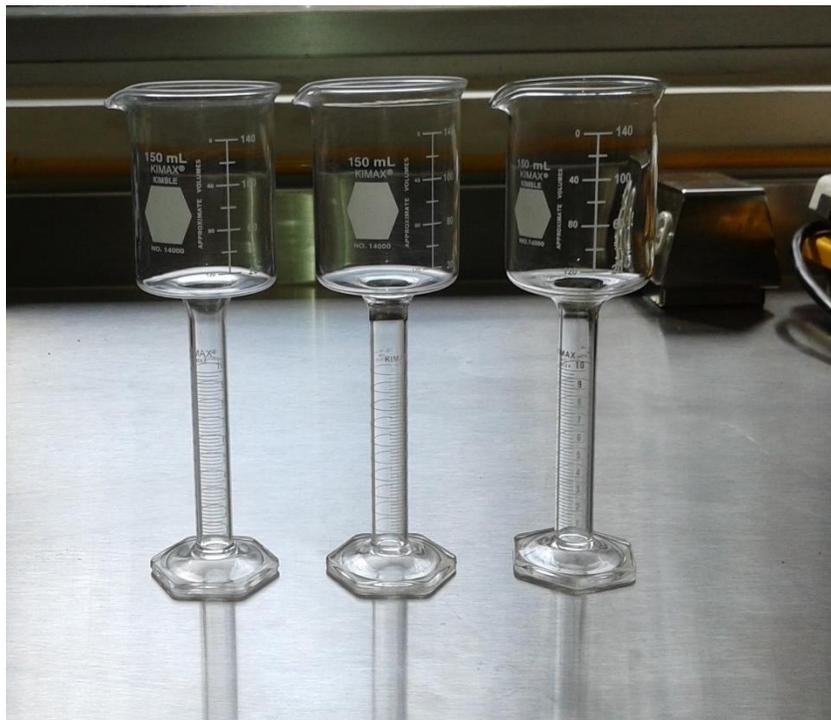


Figura 2.2. Copas de estabilidad.

Las copas fueron llenadas con espuma recién formada, hasta un volumen aproximado de 150 ml; en el fondo de las copas se colocó un lecho de fibra de vidrio, para evitar el flujo de la espuma; se midió el líquido drenado de las espumas en intervalos de 5 minutos por un tiempo total de 30 minutos (Martínez-Padilla *et al.*, 2014). La prueba se realizó por triplicado. Posteriormente, se determinó la cinética de drenado, por medio de gráficas del volumen drenado (ml) en función del tiempo (segundos) elaboradas con una hoja de cálculo Excel 2013 (Microsoft Corp), y fueron ajustadas a una línea recta, en la cual la pendiente representaba a la velocidad de drenado, en ml/s. Se

realizaron 3 réplicas de la prueba, obteniéndose velocidades de drenado promedio, así como la desviación estándar y porcentaje de coeficiente de variación de éstas.

Tamaño de burbuja

Se realizó el seguimiento del tamaño de burbuja de las espumas con respecto al tiempo, por medio de un microscopio óptico (10x, Olympus, CX31, Japón) y una cámara fotográfica (Media Cybernetics Inc., Spring, MD, Estados Unidos). Se colocó espuma recién batida en un portaobjetos, y se determinó el diámetro de las burbujas por medio del software Image-Pro Discovery (V.4.5.1.29, 2002, Media Cybernetics Inc.). Las muestras se analizaron recién elaboradas (tiempo 0) y posteriormente en intervalos de 30 minutos, durante 90 minutos. La prueba se realizó por triplicado. Se determinó el diámetro de 60 burbujas, y se obtuvo un diámetro promedio, así como una distribución acumulativa porcentual de éstos con ayuda del software Minitab (V 16.1.0.0., Minitab Inc., Estados Unidos).

En el microscopio, la luz de una bombilla incide sobre un condensador que la proyecta en la muestra. Sobre la muestra se encuentra el tubo del microscopio que contiene la lente objetivo y la lente ocular, que determinan la ampliación de la imagen; estos lentes son cristales convexos, que forman imágenes por refracción de la luz que los atraviesa (Arce *et al.*, 2006).

Determinación de parámetros texturales

Se determinó la adhesividad en una prueba de fuerza bajo compresión (penetración y retirada) utilizando un texturómetro (Texture Analyser TAX T2i, Stable Micro Systems, Inglaterra) con geometría cilíndrica de acrílico de una pulgada de diámetro. Se llenaron cajas Petri de 50 mm con espuma al ras, cuidando que no existieran espacios vacíos. La prueba se realizó con una celda de carga de 5 kg, una velocidad de preensayo de 5 mm/s, ensayo de 2 mm/s y retirada de 10 mm/s, con fuerza de contacto de 3 g, la distancia de penetración fue de 7.5 mm, y la velocidad de adquisición de datos de 200 puntos por segundo. La prueba se realizó a temperatura ambiente por triplicado.

A través del software Texture Expert 32 (V6.1.7.0, Stable Micro Systems, Inglaterra), se determinó la dureza o firmeza (D), que indica la fuerza máxima durante la penetración; el trabajo adhesivo (TA), el cual es el área bajo la curva de retirada antes

de la fuerza máxima; y el trabajo cohesivo (TC), el cual es el área bajo la curva de retirada después de la fuerza máxima (Figura 2.3).

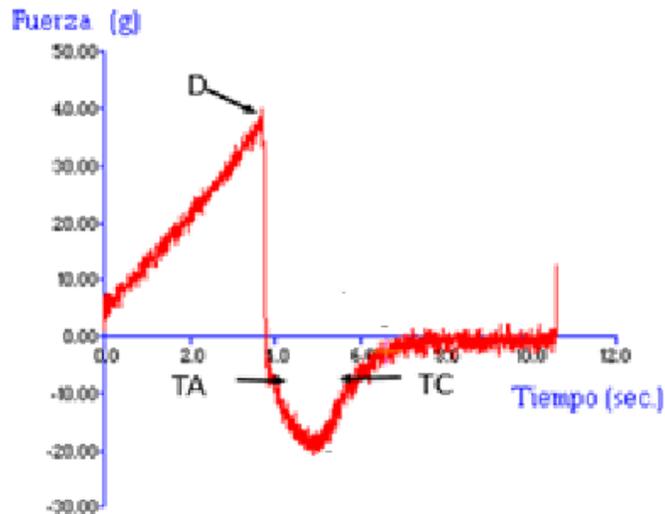


Figura 2.3. Perfil típico de adhesividad realizado por prueba de penetración y retirada en dulce para helado (ref).

Para la medición instrumental, se estima la textura percibida del alimento, por las condiciones de procesado en la boca, podría estar directamente relacionada con la deformación o cambio de las propiedades físicas del producto, por efecto de la compresión mecánica o de esfuerzo cortante (Lara y Lescano, 2004).

La adhesividad evalúa la fuerza requerida para retirar la muestra de un alimento que se adhirió a la boca (dientes, cavidad oral, paladar) con la lengua; el alimento es retirado por un movimiento descendente de la lengua y los hilos resultantes son percibidos como pegajosos, mientras que la cohesividad es el grado con el cual la muestra de alimento se mantiene unida, es juzgada simulando la compresión de la lengua sobre el paladar (Pascua *et al.*, 2013).

3. RESULTADOS

3.1. Propiedades de la fase acuosa

pH

Se determinó el pH de los sistemas acuosos como parámetro de control de éstos, los valores promedio obtenidos se muestran en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1 pH de sistemas acuosos de concentrado de proteína de suero lácteo (CPSL) y goma xantana (GX), y posterior adición de fructanos de agave (FA).

Sistema de estudio	pH	C. V. (%)
CPSL 15 % GX 0.1 %	6.28 ^a (\pm 0.01)	0.16
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 1 %	6.26 ^a (\pm 0.01)	0.18
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 5 %	6.22 ^b (\pm 0.01)	0.09
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 10 %	6.20 ^b (\pm 0.01)	0.09
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 15 %	6.18 ^c (\pm 0.01)	0.09
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 20 %	6.16 ^{c,d} (\pm 0.01)	0.09
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 25 %	6.14 ^d (\pm 0.01)	0.19

Desviación estándar se muestra entre paréntesis. Mismos superíndices indican que no hay diferencias significativas entre promedios aritméticos.

El pH de los sistemas acuosos compuestos por concentrado de proteína de suero lácteo (CPSL) y goma xantana (GX) fue cercano a los valores reportados por Martínez-Padilla *et al.*, (2015) de 6.3 en sistemas compuestos por mezclas de GX y CPSL. Con la adición e incremento de fructanos de agave (FA) en los sistemas, el pH mostró una tendencia a disminuir hasta 6.14. El análisis de varianza reflejó la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05\%$). La comparación de promedios aritméticos por una prueba de Tukey expresó que el efecto de la adición de FA en los sistemas resultó ser significativa a concentraciones del 5, 15 y 20%; no existieron diferencias significativas entre los promedios de las muestras con 5 y 10 %, así como tampoco entre las muestras con 15 y 20%; y 20 y 25% de concentración de FA.

El pH de los sistemas, se encontró alejado del punto isoeléctrico de la β - lactoglobulina (4.2-5.5), proteína que brinda la funcionalidad en CPSL, por lo cual se consideró que ésta se mantuvo soluble y estable. La variación del pH de los sistemas fue pequeña, por lo cual no mostró efectos sobre las propiedades espumantes del CPSL.

Densidad relativa

La densidad relativa de los sistemas acuosos se obtuvo a 20 °C; los valores obtenidos se resumen en la Cuadro 3.2; se muestran sólo valores promedio, no se muestran desviación estándar ni coeficiente de variación debido a que éstos fueron igual a cero.

Cuadro 3.2. Densidad relativa de los sistemas acuosos de concentrado de proteína de suero lácteo (CPSL) y goma xantana (GX), y posterior adición de fructanos de agave (FA).

Sistema de estudio	Densidad relativa
CPSL 15 % GX 0.1 %	1.053 ^a
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 1 %	1.057 ^b
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 5 %	1.076 ^c
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 10 %	1.096 ^d
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 15 %	1.120 ^e
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 20 %	1.138 ^f
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 25 %	1.149 ^g

Mismos superíndices indican que no hay diferencias significativas entre promedios aritméticos.

En general, la densidad de los sistemas acuosos fue superior a la unidad, comparado con el valor de la densidad del agua a las mismas condiciones (0.9982 g/cm³), y mostró una tendencia a aumentar con respecto al aumento de la concentración de los FA.

Pruebas de flujo

El comportamiento al flujo correspondiente a la primera etapa de cizallamiento se muestra en la Figura 3.1. El CPSL al 15% presentó un comportamiento newtoniano en un intervalo de velocidad de cizalla de 100 a 1000 1/s, con una viscosidad de 0.0027 Pa·s. Por su parte, las disoluciones de GX al 0.1% exhibieron comportamiento altamente adelgazante a la cizalla, el cual es característico en disoluciones de biopolímeros. Al tener un sistema conjunto de CPSL y GX, se observó un aumento de la viscosidad del sistema, con una clara influencia de GX en cuanto a la tendencia de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla.

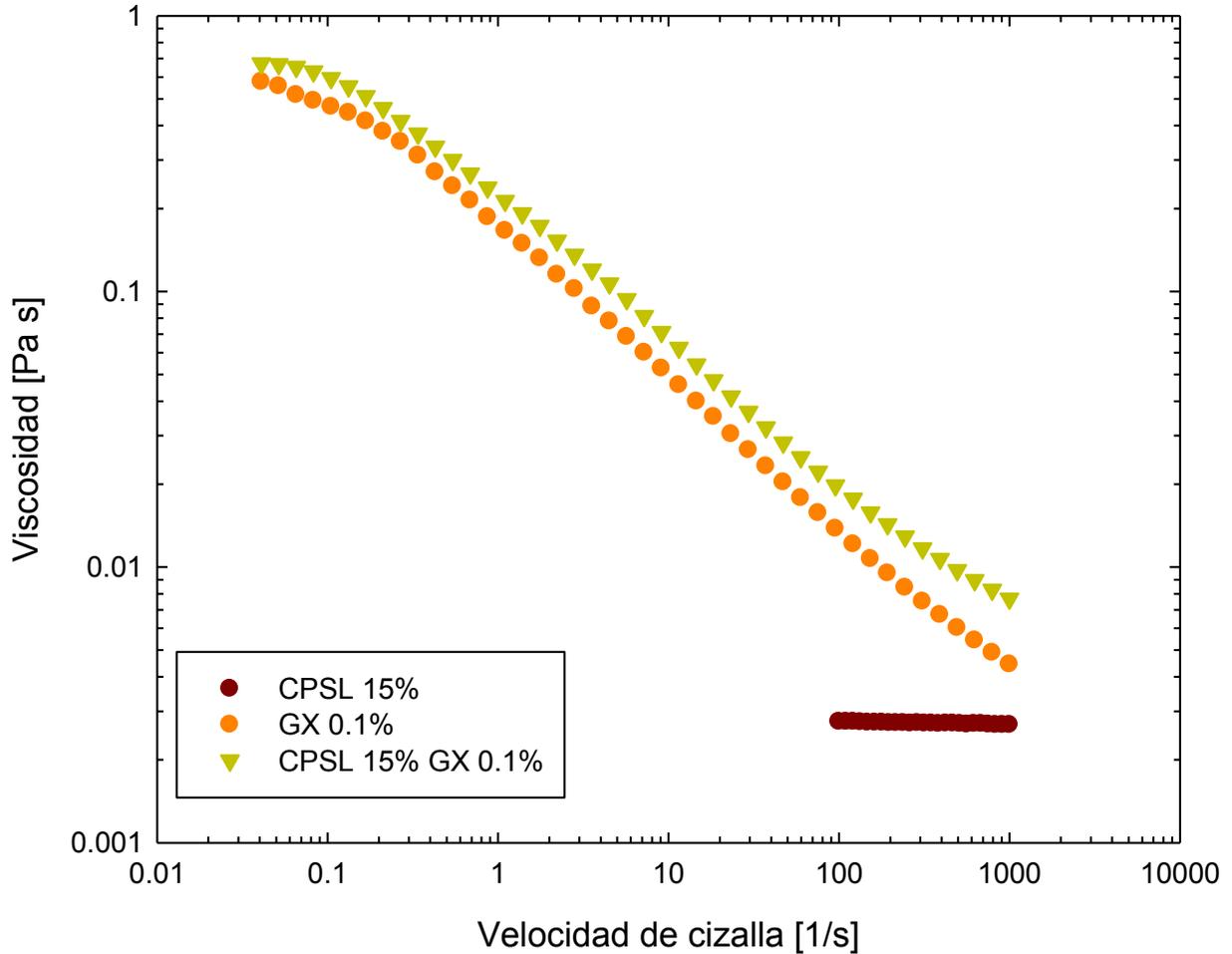


Figura 3.1. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de los sistemas líquidos. Concentrado de proteínas de suero lácteo (CPSL) y goma xantana (GX).

La inclusión de GX en los sistemas acuosos de CPSL modificó el comportamiento reológico de estos últimos (Figura 3.1). De manera general, presentaron una meseta de viscosidad constante (η_0) a bajas velocidades de cizalla (de 0.01 a 0.1 1/s, aproximadamente), seguido de una disminución de viscosidad de acuerdo al modelo de la potencia, pero sin mostrar de manera definida la meseta de viscosidad constante a altas velocidades de cizalla (η_∞), como se ha descrito en materiales altamente fluidificantes (Rao, 2007) y característico de disoluciones acuosas de GX (Phillips y Williams, 2009). Por su parte, la adición de FA en los sistemas incrementó la viscosidad, como se aprecia en la Figura 3.2, además de permitir observar de manera

más definida la región de η_{∞} . Los sistemas fueron ajustados al modelo de Carreau-Yasuda, y sus parámetros se muestran en el Cuadro 3.3.

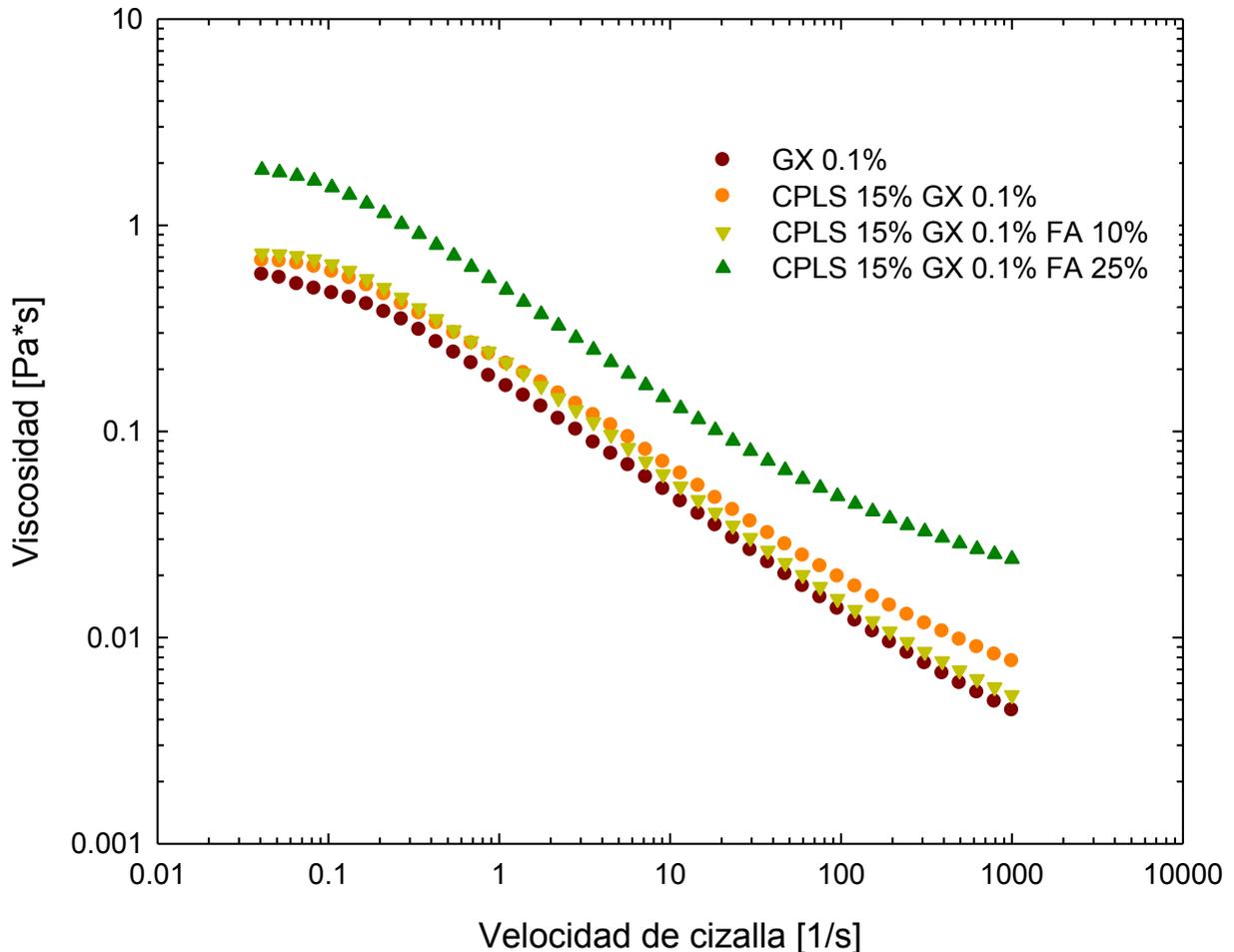


Figura 3.2. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla. Concentrado de proteínas de suero lácteo (CPSL), goma xantana (GX) y fructanos de agave (FA).

La η_0 mostró una tendencia a aumentar significativamente con respecto a la adición de hidrocoloides en el sistema, en el caso de GX, al adicionarse CPSL, η_0 pasó de 0.60 a 0.96 Pa*s, representando un aumento del 60%. Así mismo, al comparar la viscosidad η_0 obtenida en el sistema CPSL 15% GX 0.1% FA 1%, se observó un aumento de la viscosidad al pasar de 0.96 a 1.31 Pa*s, lo cual corresponde a un aumento del 36% con respecto al sistema base que no incluía FA. Sin embargo, sistemas acuosos con concentraciones de FA del 1

al 10% no mostraron diferencias significativas en dicho valor, mientras que los sistemas con FA al 15, 20 y 25% mostraron diferir significativamente en sus valores de η_0 . Estas variaciones se observan en las curvas de la Figura 3.2.

Con respecto a η_∞ , se observó también un aumento en los valores promedio, siendo que, para la disolución de GX fue de 0.0013 Pa·s en comparación del sistema compuesto por CPSL y GX, donde la viscosidad promedio obtenida fue de 0.0041 Pa·s, lo cual representa un aumento del 23%. Al adicionar FA en 1% en el sistema base de CPSL y GX, η_∞ incrementó desde 0.0041 a 0.0044 Pa·s, aumentando entonces un 5% con respecto a éste. Esta tendencia hacia el aumento de η_∞ continúa con respecto a la concentración de FA adicionado a los sistemas, pasando entonces de 0.0044 Pa·s al 1% de FA hasta 0.0166 Pa·s con 25% de FA en el sistema, siendo entonces un aumento significativo del 277%.

Entre GX y CPSL se ha demostrado que existe un efecto positivo con respecto al aumento de viscosidad presentado, tal como se menciona en los trabajos realizados por Martínez-Padilla *et al.* (2015), los cuales sugieren que este efecto sinérgico es debido a la incompatibilidad termodinámica entre ambos hidrocoloides. Por su parte, la inclusión de FA aumentó ambas viscosidades (η_0 y η_∞) en los sistemas; esto puede deberse a la formación de puentes de hidrógeno entre CPSL y FA, para satisfacer el requerimiento de hidrógeno de los grupos polares en la superficie de la proteína, tal y como lo reportado por Rodríguez-Furlán *et al.* (2014), con el uso de FA como protectores de proteínas de plasma bovino. El aumento de η_0 requiere cierta concentración de FA para poder llevar a cabo la interacción entre ambos biopolímeros; igualmente, el aumento de η_∞ puede deberse a esta interacción, pues tras el cizallamiento a altas velocidades, los agregados formados por la GX se rompen progresivamente, permaneciendo entonces el comportamiento reológico debido a la interacción CPSL y FA.

El tiempo característico (λ), el cual corresponde al inverso de la velocidad de cizalla a la cual comenzó el comportamiento adelgazante a la cizalla, incrementó también con respecto a la concentración de FA presente en el sistema acuoso, lo cual indicó que los sistemas acuosos con mayor concentración de FA comenzaron a ser fluidificantes

Cuadro 3.3. Viscosidad y Parámetros del modelo de Carreau-Yasuda de los sistemas acuosos estudiados.

Sistema acuoso estudiado		η_0 (Pa·s)	η_∞ (Pa·s)	λ (s)	a	n
GX 0.1 %	Valor promedio	0.60^a (± 0.04)	0.0013^a (± 0.0001)	6.1^a (± 0.4)	0.97^a (± 0.10)	0.40^a (± 0.01)
	C. V. (%)	5.9	6.6	6.3	10	2.6
CPSL 15 % GX 0.1 %	Valor promedio	0.96^b (± 0.01)	0.0041^b (± 0.0003)	8.5^{b,c} (± 0.4)	0.74^{a,b} (± 0.05)	0.38^{a,b,c} (± 0.01)
	C. V. (%)	1.1	7.6	4.5	7	1.8
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 1 %	Valor promedio	1.31^c (± 0.04)	0.0044^{b,c} (± 0.0003)	8.9^{b,c,e} (± 0.7)	0.78^{a,b} (± 0.02)	0.37^b (± 0.01)
	C. V. (%)	3.2	6.4	7.5	2	3
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 5 %	Valor promedio	1.34^c (± 0.06)	0.0052^c (± 0.0002)	9.9^{b,e} (± 0.4)	0.89^{b,c} (± 0.01)	0.36^c (± 0.01)
	C. V. (%)	4.5	4.8	4.5	0.7	2.2
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 10 %	Valor promedio	1.32^c (± 0.06)	0.0071^d (± 0.0005)	7.9^c (± 0.4)	1.13^{c,d} (± 0.10)	0.36^c (± 0.01)
	C. V. (%)	4.4	7	4.5	9.1	2.1
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 15 %	Valor promedio	1.77^d (± 0.12)	0.0098^e (± 0.0002)	10.4^{d,c} (± 0.4)	1.26^d (± 0.05)	0.38^{b,c} (± 0.01)
	C. V. (%)	7	1.7	3.6	3.7	1.9
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 20 %	Valor promedio	2.51^e (± 0.06)	0.0149^f (± 0.0004)	11.8^d (± 0.7)	1.71^e (± 0.07)	0.37^c (± 0.002)
	C. V. (%)	2.6	2.5	6.0	4.1	0.5
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 25 %	Valor promedio	1.98^f (± 0.11)	0.0166^g (± 0.0003)	10.1^e (± 0.6)	1.51^e (± 0.12)	0.39^{a,b} (± 0.001)
	C. V. (%)	5.3	1.9	5.7	8	0.3

Desviación estándar se muestra entre paréntesis. Mismos superíndices indican que no hay diferencias significativas entre promedios aritméticos.

a velocidades de cizalla cada vez menores (de 0.085 a 0.117 1/s) en comparación con los sistemas que sólo incluían CPSL y GX (0.163 1/s). El análisis de varianza mostró diferencias significativas ($p < 0.05$ %). Las diferencias de medias mostraron que la adición de CPSL a los sistemas acuosos de GX aumentó significativamente los valores de tiempo característico en comparación a la disolución de GX, al pasar de 6.1 a 8.5 s. La adición de FA, por su parte, mostró un impacto significativo sobre el aumento del tiempo característico a concentraciones de FA del 20%, ya que con ésta se alcanzó el máximo valor (11.8 s), y al continuar con la adición de FA hasta 25%, tendió a disminuir, al pasar de 11.8 a 10.1 s.

El exponente α propuesto en el modelo de Carreau-Yasuda disminuyó con la adición de CPSL al sistema, al compararlo con las disoluciones de GX, pasando de 0.97 a 0.74, sin embargo, las diferencias no fueron significativas sino hasta concentraciones de FA del 20 al 25%. Con la adición de FA a los sistemas base, se observó un cambio del valor de α , el cual aumentó gradualmente en un intervalo de 0.78 a 1.17, acercándose al valor del exponente α propuesto para el modelo de Carreau, el cual es 2. Este exponente ha sido utilizado para describir el comportamiento de sistemas concentrados de polímeros, lo que explica la tendencia hacia el aumento del valor de α con respecto al incremento de la concentración de FA presentes en los sistemas de estudios.

En cuanto al índice de comportamiento al flujo (n), los valores variaron poco, aunque fueron significativamente diferentes; inicialmente el valor de n mostró una ligera disminución de éste al adicionar CPSL a los sistemas acuosos de GX, y continuó con esta tendencia hasta concentraciones de FA del 15%, a partir de la cual n comienza a aumentar. Los valores promedio de n fueron relativamente bajos (0.36 a 0.402), por lo cual los sistemas estudiados fueron altamente fluidificantes; característica común de los sistemas que incluyen GX, tal y como lo mencionan Phillips y Williams (2009).

3.2. Propiedades de las espumas

Densidad relativa

La densidad relativa obtenida de las espumas estudiadas se muestra en el Cuadro 3.4. Las espumas formadas a partir de los sistemas con FA al 1% no mostraron diferencias

significativas en cuanto a las densidades relativas obtenidas, no así para el caso de los sistemas con mayor concentración de FA, en los cuales la densidad variaron significativamente.

Los valores de densidad relativa promedio varían de 0.218 a 0.298, para las diferentes concentraciones de FA agregadas a los sistemas base de CPSL y GX. El sistema base de CPSL y GX mostraron valores menores comparados con los que incluyen FA en sus formulaciones. El aumento de la densidad de las espumas es similar al mostrado por la fase acuosa, debido al aumento de concentración de FA adicionado, con lo cual aumentaron las macromoléculas presentes en los sistemas precursores de las espumas. De igual manera, el aumento de la η_{∞} mostrada por la fase acuosa, dificultó la integración de aire durante el batido, y por ende, se obtuvieron espumas con mayor densidad en los sistemas cuya η_{∞} fue mayor, siendo éstos los de mayores concentraciones de FA.

Cuadro 3.4. Densidad relativa para las espumas de estudio. Concentrado de proteínas de suero lácteo (CPSL), goma xantana (GX) y fructanos de agave (FA).

Sistema de estudio	Densidad relativa promedio	C.V. (%)
CPSL 15 % GX 0.1 %	0.218 _a (± 0.007)	3
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 1 %	0.226 _{a,b} (± 0.011)	4.8
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 5 %	0.232 _{b,c} (± 0.003)	1.3
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 10 %	0.244 _{c,d} (± 0.003)	1.1
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 15 %	0.250 _e (± 0.001)	0.4
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 20 %	0.267 _f (± 0.003)	1.1
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 25 %	0.298 _g (± 0.003)	1

Desviación estándar se muestra entre paréntesis. Mismos superíndices indican que no hay diferencias significativas entre promedios aritméticos.

Capacidad espumante

La capacidad espumante de los sistemas acuosos se muestra en el Cuadro 3.5, expresada como rendimiento volumétrico. El máximo rendimiento volumétrico se obtuvo con el sistema base de CPSL 15% y GX 0.1%, y conforme aumenta la concentración de FA, este rendimiento disminuyó ligeramente, sin embargo, estas diferencias no resultaron estadísticamente significativas ($p= 0.246$). El rendimiento volumétrico de las espumas elaboradas resultó menor a las obtenidas por Martínez-

Padilla *et al.* (2014, 2015), las cuales, para sistemas compuestos por leche descremada en polvo 10% y CPSL 15% fue de 534%; y para CPSL 15% GX 0.05% y CPSL 15% GX 0.15% fueron del 625 y 588%, respectivamente, debido al aumento de la densidad de la fase continua, la diferencia en el tiempo de batido durante la formación de las espumas y el cambio de las propiedades de superficie del sistema acuoso mixto.

Cuadro 3.5. Capacidad espumante de las espumas de estudio. Concentrado de proteínas de suero lácteo (CPSL), goma xantana (GX) y fructanos de agave (FA).

Sistema estudiado	Rendimiento volumétrico (%)	Desviación Estándar	C.V. (%)
CPSL 15 % GX 0.1 %	406 ^a	± 6.03	1.49
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 1 %	401 ^a	± 1.53	0.38
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 5 %	394 ^a	± 3.61	0.92
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 10 %	392 ^a	± 2.08	0.53
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 15 %	389 ^a	± 2.08	0.53
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 20 %	388 ^a	± 3.51	0.90
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 25 %	389 ^a	± 4.51	1.16

Mismos superíndices indican que no hay diferencias significativas entre promedios aritméticos

La disminución de capacidad espumante está relacionada directamente con la cantidad de aire incorporado durante el batido, y éste a su vez con la viscosidad de la fase continua: mientras más viscosa sea, menor será la cantidad de aire integrado y por lo tanto, el rendimiento será menor. En el caso de los sistemas de estudio, la viscosidad responsable de este efecto podría ser η_{∞} , debido al cizallamiento al que se sometieron los sistemas acuosos para la formación de las espumas. Esta disminución del rendimiento concuerda con el aumento de la densidad relativa de las espumas.

Estabilidad por transmisión-retrodispersión de luz

El seguimiento de estabilidad realizado por transmisión-retrodispersión de la luz resultó de manera general, como el mostrado en la Figura 3.3.

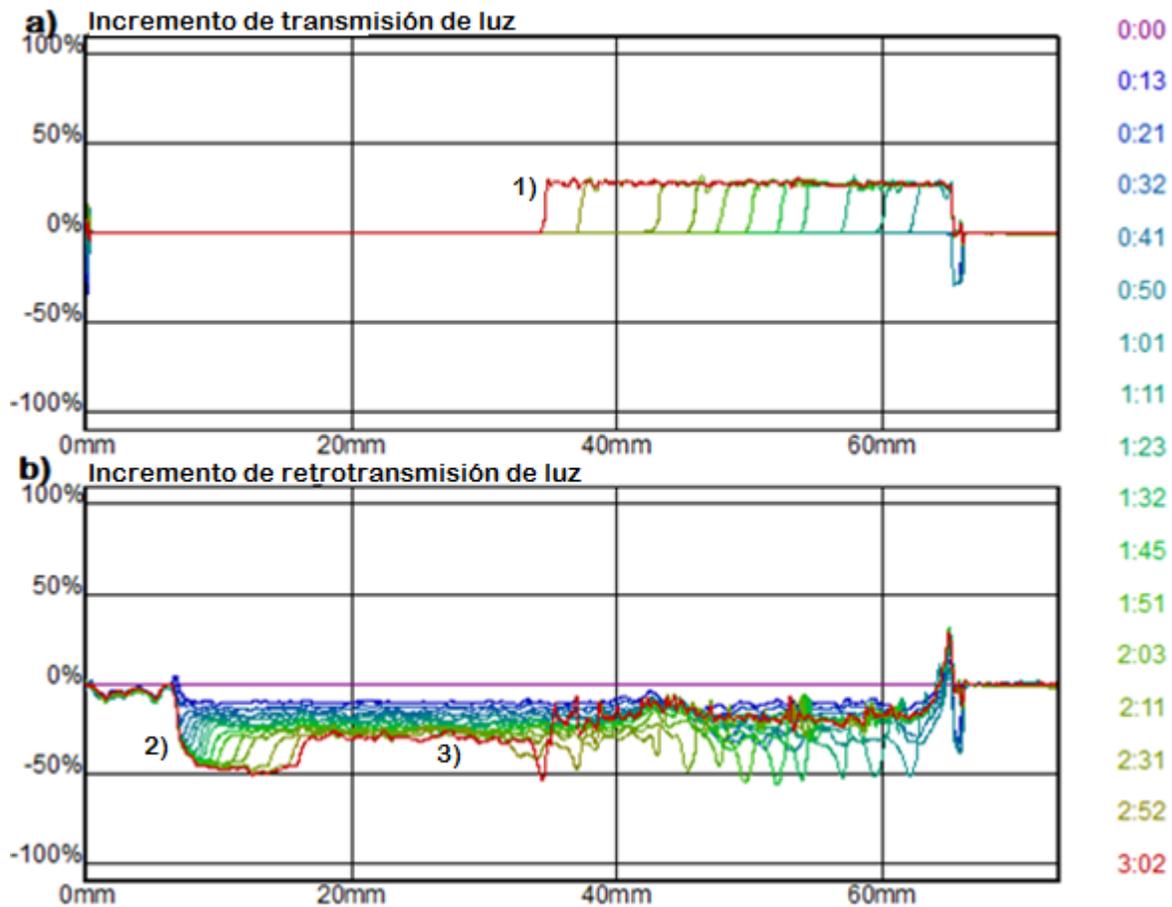


Figura 3.3. Comportamiento observado en el seguimiento de la estabilidad de las espumas por medio de la transmisión (a) y retrodispersión de la luz (b) a través de la muestra.

En los perfiles de transmisión de la luz se identificó el colapso de la espuma como los picos positivos en la parte superior del tubo de muestra, en extremo superior derecho (1); mientras que en los perfiles de retrodispersión de luz, se identificó al drenado como los picos negativos al inicio del diagrama al fondo del tubo de la muestra en el extremo inferior izquierdo (2), y al crecimiento de tamaño de burbuja debido a la maduración de Ostwald como la disminución de retrodispersión de la luz a lo largo del tubo en una zona delimitada durante el tiempo de prueba (3); tal y como lo observado por Martínez-

Padilla *et al.* (2014) para espumas compuestas de CPSL, caseinato de sodio y leche descremada en polvo.

Al incrementar la concentración de FA, las tres zonas mencionadas tendieron a permanecer constantes a lo largo del tiempo de la prueba, mientras que a menores concentraciones, mostraron una disposición a incrementar. Los parámetros de estabilidad obtenidos muestran en el Cuadro 3.6.

Todas las cinéticas mostraron una dependencia lineal de la retrodispersión de la luz con respecto al tiempo, y se calculó la velocidad como la pendiente de la línea recta resultante. Con respecto a los parámetros de estabilidad, éstos muestran una tendencia general a disminuir con respecto a la concentración de FA en el sistema, lo que significa que las espumas fueron más estables.

La velocidad de disminución de la retrodispersión de la luz (%) con respecto al tiempo en la zona central del tubo, al ser directamente proporcional al crecimiento de burbujas permitió dar seguimiento a la maduración de Ostwald. La adición de FA mostró un efecto significativo sobre esta velocidad, al disminuirla de 0.0066 a 0.0045 en porcentaje de retrodispersión de luz/s, en comparación con los sistemas base de CPSL y GX; al aumentar la concentración de FA, esta velocidad mantuvo su tendencia a disminuir, hasta alcanzar un punto mínimo de 0.0021 % retrodispersión de luz/s en el sistema con 15% de FA, concentración a partir de la cual la velocidad mostró un ligero aumento a concentraciones de 20 y 25% FA, siendo ahora las velocidades de 0.0022 y 0.0024 como porcentaje de retrodispersión de luz/s, respectivamente, sin embargo, este aumento no resultó significativo.

La disminución de la velocidad de crecimiento de burbujas, y por lo tanto, de la maduración de Ostwald puede corresponder principalmente al aumento de la viscosidad de la fase acuosa debido al aumento de concentración de FA; ya que la muestra se encontró en reposo, puede relacionarse principalmente con la η_0 de los sistemas acuosos precursores de las espumas. Igualmente, lo anterior podría relacionarse con el arreglo estructural de las moléculas de FA, gracias al cual existe disponibilidad de sus grupos hidroxilos para interactuar con las moléculas de agua circundantes, lo cual permite una alta afinidad en la interfase como lo describe Demel

et al. (1998). En ambos casos, probablemente se dio un reforzamiento de la superficie de la lamela que separaba a las burbujas de gas.

Cuadro 3.6. Parámetros de estabilidad observados en las espumas de estudio. Concentrado de proteínas de suero lácteo (CPSL), goma xantana (GX) y fructanos de agave (FA).

Sistema acuoso estudiado		Maduración de Ostwald (% retrodispersión de luz/s)	Drenado (mm/s)	Colapso (mm/s)	Tiempo estable (s)
CPSL 15 % GX 0.1 %	Promedio	0.0066^a (± 0.0006)	0.0034^a (± 0.0006)	0.0090^b (± 0.0035)	1227^{a,b} (± 56.8)
	C.V. (%)	9.1	16.4	39.5	5
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 1 %	Promedio	0.0045^b (± 0.0004)	0.0040^a (± 0.0003)	0.0150^a (± 0.0020)	570^a (± 110)
	C.V. (%)	7.7	6.2	13.0	19
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 5 %	Promedio	0.0026^c (± 0.0001)	0.0026^b (± 0.0001)	0.0049^{b,c} (± 0.0014)	1800^{b,c} (± 625)
	C.V. (%)	4.5	4.5	27.7	35
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 10 %	Promedio	0.0027^c (± 0.0003)	0.0014^c (± 0.0001)	0.0045^{bc} (± 0.0008)	1732^b (± 267)
	C.V. (%)	9.44	4.03	17.96	15
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 15 %	Promedio	0.0021^c (± 0.0004)	0.0008^{c,d} (± 0.0003)	0.0031^c (± 0.0017)	2860^{c,d} (± 380)
	C.V. (%)	17.7	30.2	56.7	13
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 20 %	Promedio	0.0022^c (± 0.0002)	0.0003^d (± 0.0002)	-	4492^e (± 320)
	C.V. (%)	6.8	57.7	-	7
CPSL 15 % GX 0.1 % FA 25 %	Promedio	0.0024^c (± 0.0001)	0.0004^d (± 0.0001)	-	3950^{e,d} (± 590)
	C.V. (%)	2.4	25.0	-	15

(-) Indican que el proceso no se desarrolló a lo largo del tiempo de evaluación. Desviación estándar se muestra entre paréntesis. Mismos superíndices indican que no hay diferencias significativas entre medias.

La velocidad de drenado mostró un aumento inicial al adicionar 1% de FA al pasar de 0.0034 a 0.0040 mm/s, sin embargo, no resultó estadísticamente significativo. El efecto de la concentración de FA resultó evidente para sistemas con concentraciones de FA mayores o iguales de 5%, disminuyendo la velocidad de drenado de 0.0040 a 0.0026

mm/s; esta tendencia hacia la disminución de la velocidad continuó conforme aumentaba la concentración de FA en los sistemas, hasta alcanzar su valor mínimo en los sistemas con 20% FA, con un promedio de 0.0003 mm/s. A partir de esta concentración, se mostró un ligero aumento en la velocidad de drenado, sin embargo, éste no fue significativo.

Al aumentar la concentración de FA en la fase continua, se favoreció el aumento de la viscosidad de ésta, disminuyendo el movimiento de las burbujas de gas y por lo tanto, reduciendo el líquido drenado, como lo explica Huppertz (2010) para espumas lácteas. Para los sistemas estudiados, es mayormente debido al aumento de la η_0 , al encontrarse la muestra sin cizallamiento aparente. Este aumento en η_0 está asociado a la funcionalidad de los FA en los sistemas, tal y como se comentó anteriormente.

La velocidad de colapso de las espumas mostró también un aumento significativo al adicionar 1% de FA en los sistemas, al pasar de 0.0090 mm/s para los sistemas base de CPSL y GX, a 0.0150 mm/s sin embargo, al aumentar la concentración de FA, la velocidad de colapso comenzó a disminuir, hasta alcanzar un mínimo de 0.0031 mm/s en los sistemas con 15% FA. Los sistemas con concentraciones mayores de FA fueron más estables frente al colapso.

El tiempo durante el cual las espumas fueron estables mostró una disminución inicial debido a la presencia de FA, pasando de 1227 s para los sistemas base de CPSL y GX, a 570 s en las muestras con 1% FA. Concentraciones mayores al 1% de FA presentaron tiempos estables mayores, con un tiempo máximo de 4492 s en los sistemas con 20% FA. El tiempo estable para las espumas con 25% FA se redujo en comparación con la anterior, al pasar de 4492 a 3950 s, sin embargo, esta disminución no resultó significativa.

El aumento del tiempo estable de los sistemas es resultado de la disminución de las velocidades de desestabilización; aunque los porcentajes de coeficientes de variación resultantes fueron mayores al 10%, éstos se deben a la heterogeneidad de las muestras, característica propia de las espumas, y resulta concordante con lo obtenido por Martínez-Padilla *et al.* (2014, 2015) en espumas de leche descremada fortificada en mezcla con proteínas lácteas y en espumas formadas a partir de concentrado de proteínas de suero lácteo y goma xantana.

Tamaño de burbuja

En general, el aumento de FA en los sistemas permitió la obtención de espumas con burbujas de menor diámetro, tal y como lo muestra el Cuadro 3.7. Inicialmente puede observarse un aumento significativo del diámetro de burbuja inicial en los sistemas con FA 1%, en comparación con los sistemas base de CPSL y GX, al pasar de 0.13 a 0.22 mm; sin embargo, al aumentar la concentración de FA en los sistemas, el diámetro de burbuja promedio mostró una tendencia a disminuir, hasta un valor mínimo de 0.08 mm, en los sistemas con 25% FA. Los diámetros promedio de los sistemas compuestos por CPSL y GX resultaron menores con respecto a los obtenidos por Martínez-Padilla *et al.* (2014) para sistemas compuestos por CPSL 15% GX 0.05%, y CPSL 15% GX 0.15%, los cuales fueron de 0.207 y 0.198 mm, respectivamente, aunque mayores que los diámetros de burbujas de los sistemas compuestos por leche descremada al 10% y CPSL 15%, cuyo promedio fue de 0.089 mm.

Cuadro 3.7. Diámetros de burbuja iniciales de las espumas de estudio. Concentrado de proteínas de suero lácteo (CPSL), goma xantana (GX) y fructanos de agave (FA).

Sistema de estudio	Diámetro (mm)
CPSL 15% GX 0.1%	0.13 ^{b,c} (± 0.08)
CPSL 15% GX 0.1% FA 1%	0.22 ^a (± 0.19)
CPSL 15% GX 0.1% FA 5%	0.12 ^{b,c} (± 0.07)
CPSL 15% GX 0.1% FA 10%	0.13 ^{b,c} (± 0.09)
CPSL 15% GX 0.1% FA 15%	0.14 ^b (± 0.10)
CPSL 15% GX 0.1% FA 20%	0.10 ^{c,d} (± 0.05)
CPSL 15% GX 0.1% FA 25%	0.08 ^d (± 0.04)

Desviación estándar se muestra entre paréntesis. Mismos superíndices indican que no hay diferencias significativas entre medias.

Se observaron desviaciones estándar altas, lo cual evidencia que las espumas presentaron heterogeneidad de tamaños, similar a lo observado por Martínez-Padilla *et al.* (2014, 2015); estas desviaciones disminuyeron con respecto a la concentración de FA presente en los sistemas, indicando entonces cierta homogeneidad en cuanto a los diámetros de burbuja.

A bajas concentraciones de FA en los sistemas, las burbujas mostraron una gran variedad de tamaños, lo cual se apreció en el histograma de la Figura 3.4 en la apertura

de las curvas de frecuencia de diámetro de burbuja, mientras que en las curvas de distribución acumulativa de la Figura 3.5 se observó como el cambio de pendiente de las curvas. Conforme aumenta la concentración de FA, esta diversidad de diámetros de burbuja presentados por los sistemas disminuyó, es decir, que las espumas presentaron mayor uniformidad con respecto al tamaño de las burbujas; este cambio se puede apreciar en el histograma como la reducción de columnas presentes, y de manera análoga en las curvas acumulativas, donde las curvas resultantes de sistemas con mayores concentraciones de FA presentaron menor variación de la pendiente de éstas.

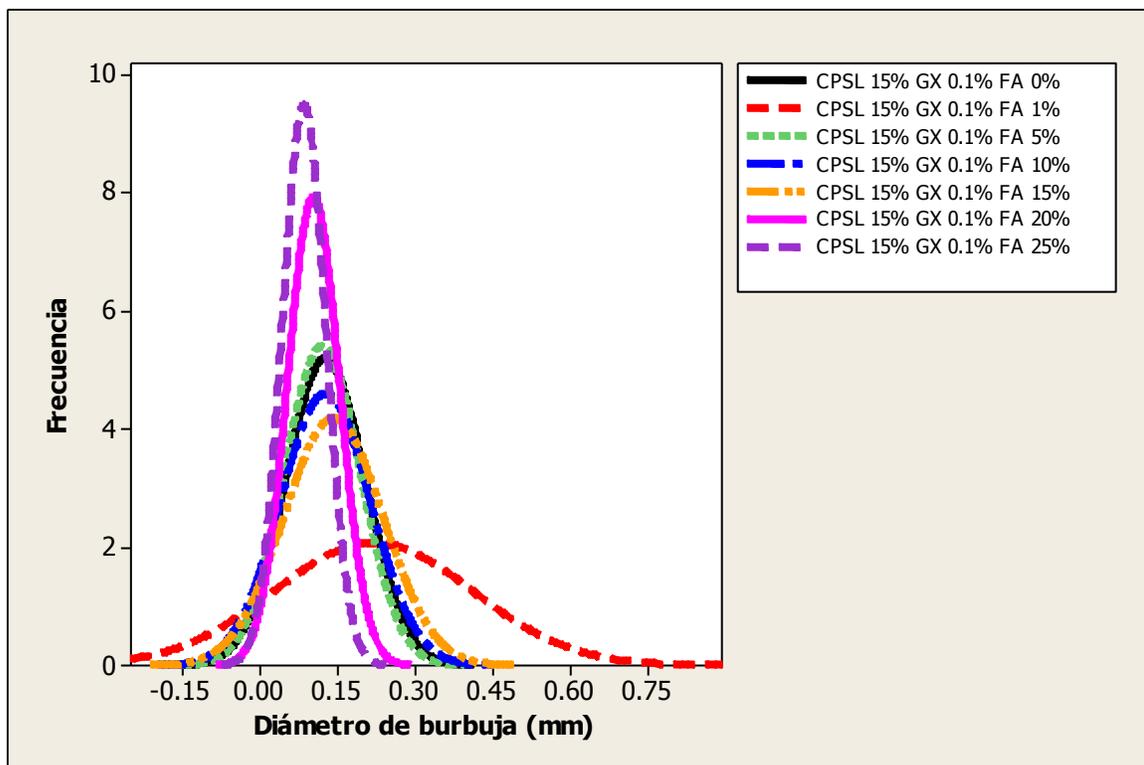


Figura 3.4. Histograma de frecuencia de diámetro de burbuja de las espumas de estudio recién batidas. Concentrado de proteína de suero lácteo (CPSL) y goma xantana (GX), y posterior adición de fructanos de agave (FA).

El tamaño de burbuja en las espumas estudiadas es resultado de la viscosidad de la fase acuosa que las conforma; en este caso, al ser una prueba realizada en reposo, y sin cizallamiento alguno, podría ser consecuencia mayormente de η_0 , lo cual

concuera con lo observado por Drenckhan y Saint-Jalmes (2015), quienes indican que el tamaño de burbuja depende de las propiedades reológicas de la fase acuosa, y como criterio eurístico establecen que a mayor viscosidad de la fase acuosa, las burbujas serán de menor tamaño y la fracción de gas incorporada será más baja.

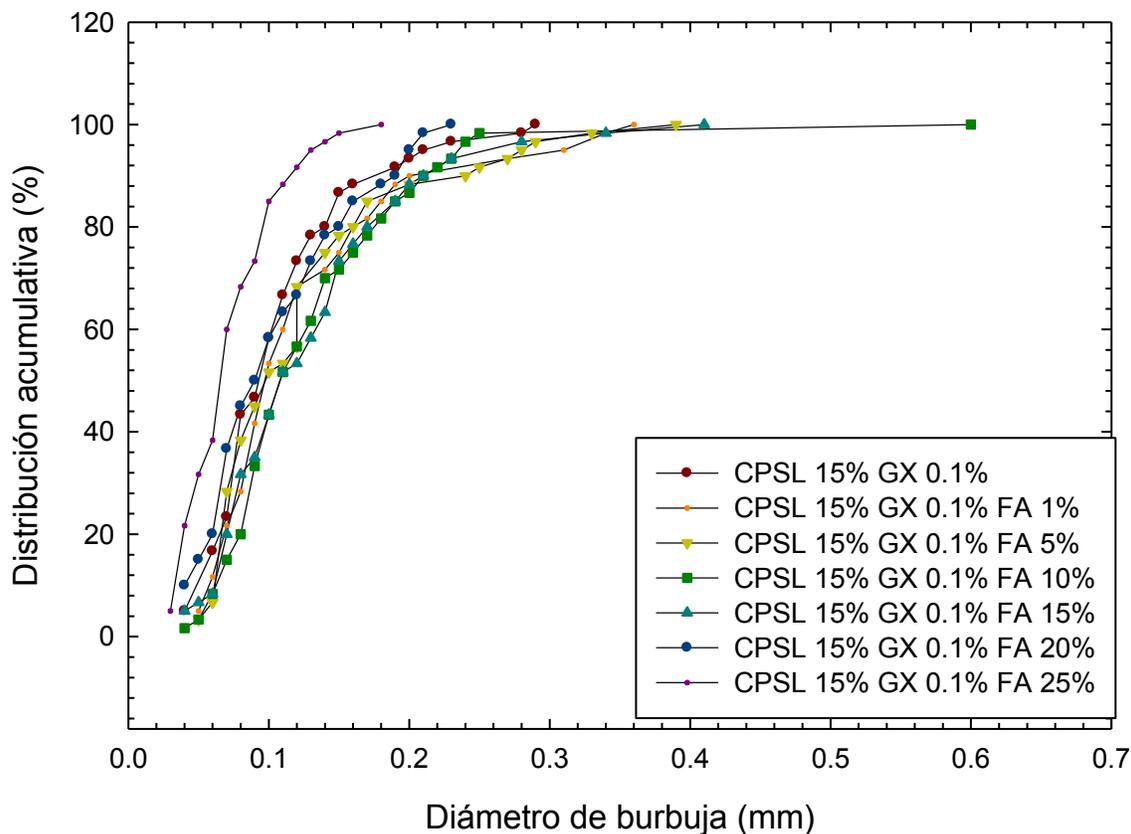


Figura 3.5. Curvas de distribución acumulativa de diámetro de burbuja de las espumas de estudio recién batidas. Concentrado de proteína de suero lácteo (CPSL) y goma xantana (GX), y posterior adición de fructanos de agave (FA).

Con respecto a la variación del tamaño de burbuja en función del tiempo, las burbujas mostraron tendencia a aumentar de tamaño hasta romperse (Figura 3.6). Las espumas con bajas concentraciones de FA mostraron poca resistencia a la desestabilización debido a la desproporción del tamaño de burbujas, colapsándose antes de los 30 minutos; la estabilidad frente a la maduración de Ostwald se logró a concentraciones de 20 y 25% de FA; estos resultados muestran concordancia con los obtenidos por el seguimiento de dispersión-retrodispersión de la luz, por lo cual a mayores

concentraciones de FA en los sistemas menor es la velocidad de la maduración de Ostwald y entonces, mayor es el tiempo estable de las espumas.

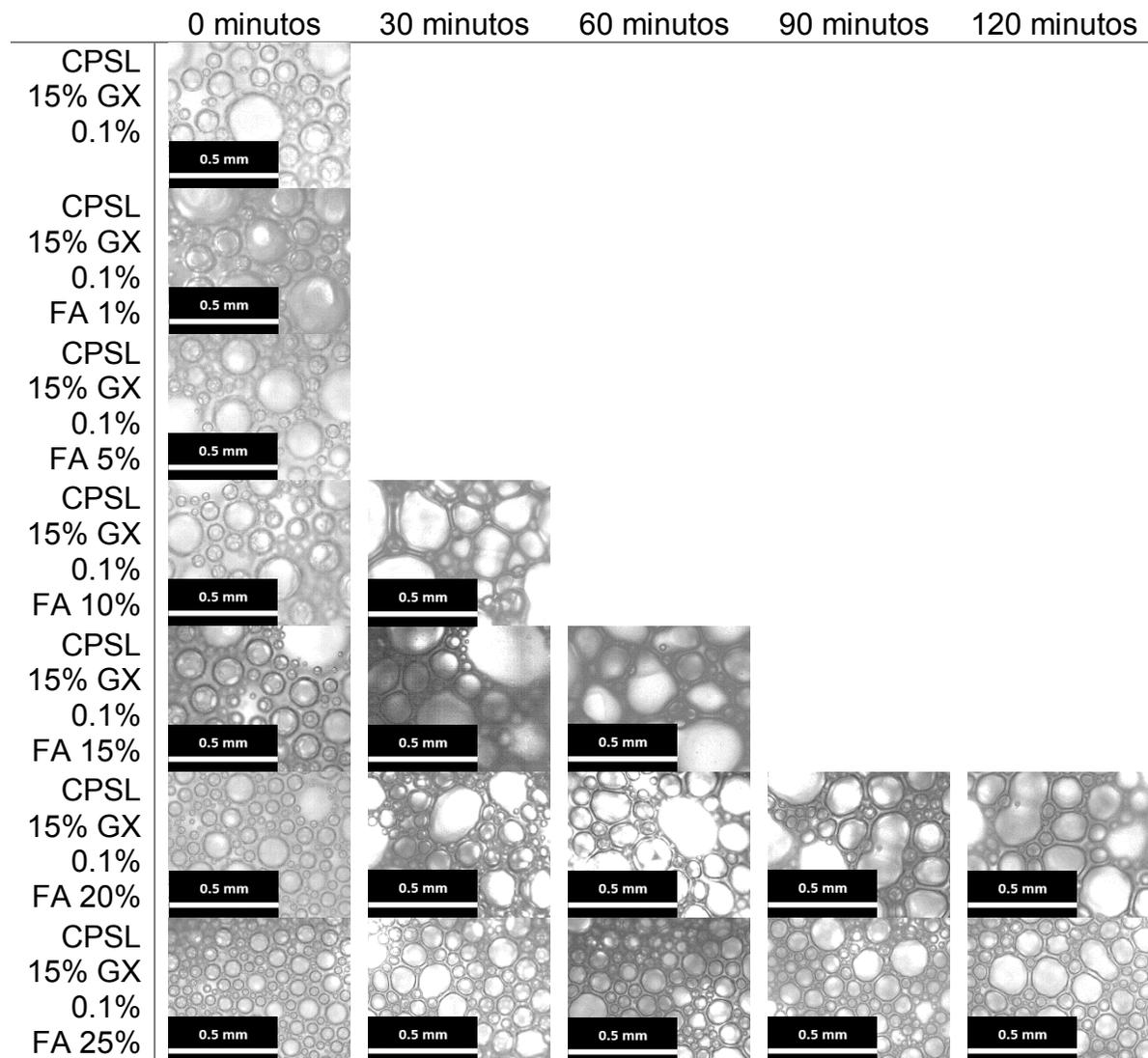


Figura 3.6. Imágenes microscópicas (objetivo 10x) de las espumas frescas, 30, 60, 90 y 120 minutos después de su formación. Concentrado de proteínas de suero lácteo (CPSL), goma xantana (GX) y fructanos de agave (FA).

Estabilidad por drenado gravimétrico

El comportamiento del drenado de las espumas con respecto al tiempo se muestra en la Figura 3.7. A diferencia de los estudios realizados por Marinova *et al.* (2009), y Martínez-Padilla *et al.* (2014, 2015), el drenado de las espumas mostró una

dependencia lineal, por lo cual la velocidad de drenado se calculó como la pendiente de la línea recta resultante. Se delimitó la línea recta hasta el primer cambio de pendiente que presentara (líneas rojas punteadas). El tiempo estable se determinó como el tiempo durante el cual las espumas no mostraron drenado. Lo anterior se resume en el Cuadro 3.8.

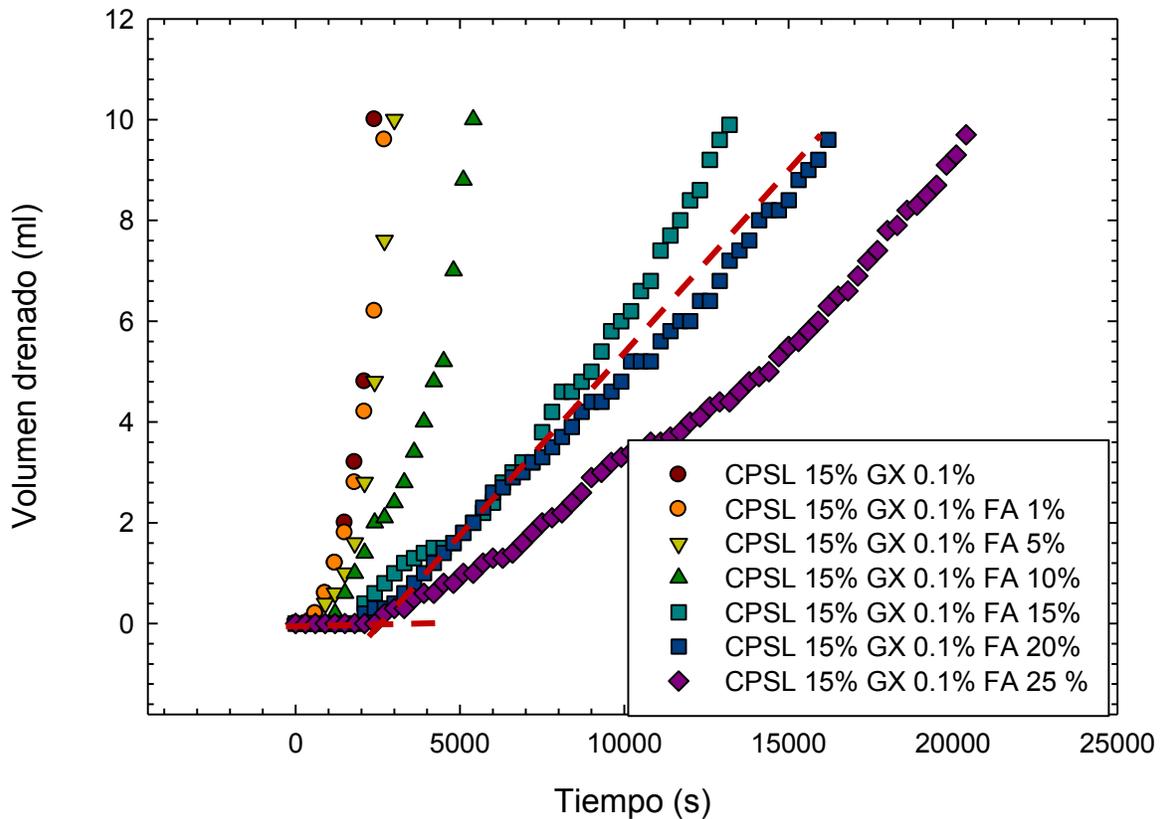


Figura 3.7. Volumen de drenado en función del tiempo en las espumas de estudio. Concentrado de proteínas de suero lácteo (CPSL), goma xantana (GX) y fructanos de agave (FA).

Las velocidades de drenado obtenidas de los sistemas base de CPSL 15% y GX 0.1% mostraron concordancia con las obtenidas por Martínez-Padilla *et al.* (2015), para sistemas compuestos por CPSL 15% GX 0.05% y CPSL 15% GX 0.15%, las cuales fueron de 0.004 y 0.001 ml/s, respectivamente. Los sistemas a concentraciones de FA relativamente altas (15, 20 y 25%) mostraron menores velocidades de drenado en

comparación con las antes referidas, con lo cual se demuestra el carácter estabilizante de los FA frente a este proceso de desestabilización.

Cuadro 3.8. Velocidades de drenado y tiempos durante el que permanecieron estables las espumas de estudio. Concentrado de proteínas de suero lácteo (CPSL), goma xantana (GX) y fructanos de agave (FA).

Sistema de estudio		Velocidad de drenado (ml/s)	Tiempo estable (s)
CPSL 15% GX 0.1%	Promedio	0.0019^a (± 0.0002)	400^a (± 173)
	C.V. (%)	9.1	43
CPSL 15% GX 0.1% FA 1%	Promedio	0.0019^a (± 0.0002)	400^a (± 173)
	C.V. (%)	9.1	43
CPSL 15% GX 0.1% FA 5%	Promedio	0.0013^b (± 0)	600^{a,b} (± 0)
	C.V. (%)	0	0
CPSL 15% GX 0.1% FA 10%	Promedio	0.0012^b (± 0.0001)	900^b (± 0)
	C.V. (%)	4.7	0
CPSL 15% GX 0.1% FA 15%	Promedio	0.0006^c (± 0.0001)	1800^c (± 300)
	C.V. (%)	9.1	17
CPSL 15% GX 0.1% FA 20%	Promedio	0.0006^c (± 0)	1900^c (± 173)
	C.V. (%)	0	9
CPSL 15% GX 0.1% FA 25%	Promedio	0.0004^c (± 0)	2500^d (± 173)
	C.V. (%)	0	7

Desviación estándar se muestra entre paréntesis. Mismos superíndices indican que no hay diferencias significativas entre medias.

La disminución de la velocidad de drenado permitió que el tiempo durante el cual las espumas se mantuvieron estables fuera mayor. El tiempo estable de los sistemas de estudio tendió a aumentar con respecto a la concentración de FA; llegando a un máximo de 2500 s a una concentración del 25% de FA. El efecto de FA sobre el tiempo estable resultó significativo en los sistemas con 10% FA, al pasar de 400 a 900 s, en comparación con el sistema base y los sistemas de menor concentración de FA. Estos

resultados mostraron una tendencia similar a los obtenidos por medio del análisis transmisión-retrodispersión de la luz anteriormente mostrado, con lo cual se refuerza la capacidad estabilizante de los FA al aumentar la viscosidad de la fase continua, y por el carácter estático de la prueba, se relaciona más próximamente con el aumento de la η_0 .

Parámetros texturales

El perfil general obtenido de la prueba de adhesividad por penetración y retirada en el texturómetro se muestra en la Figura 3.8; los parámetros obtenidos de la prueba se resumen en el Cuadro 3.9. De manera general, la tendencia de los sistemas fue el aumento de los parámetros texturales a partir de cierta concentración de FA.

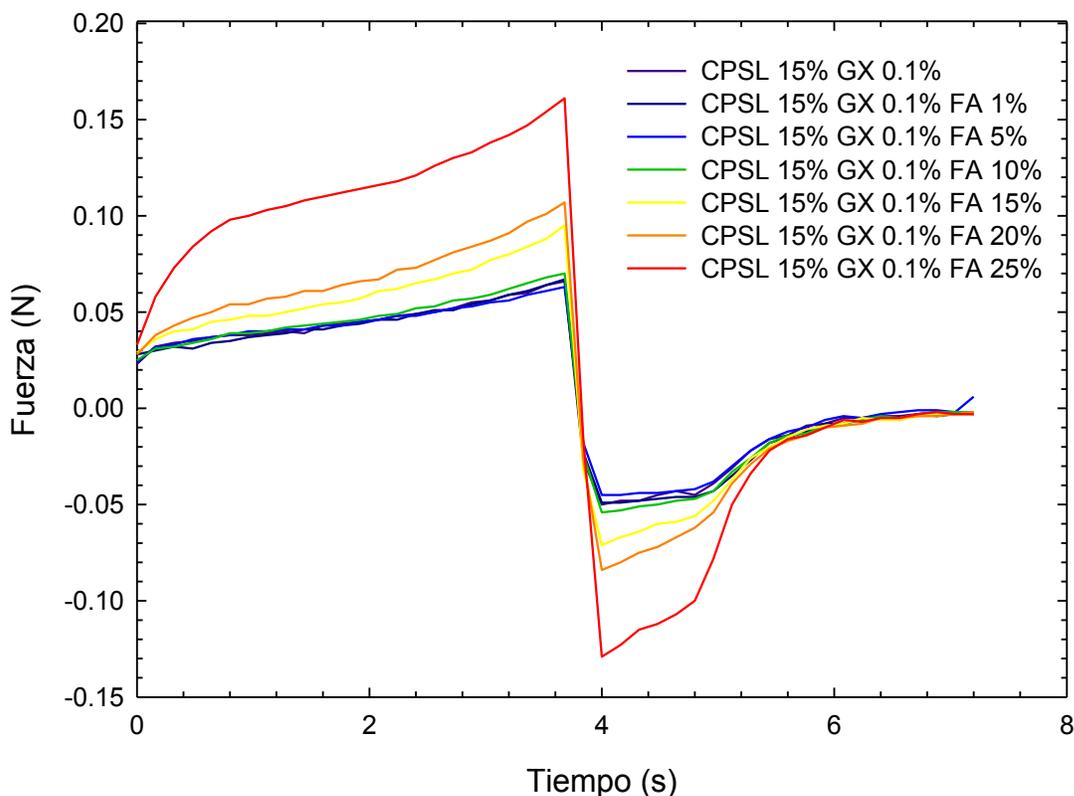


Figura 3.8. Comportamiento obtenido tras realizar pruebas de adhesividad por penetración y retirada de las espumas de estudio. Concentrado de proteínas de suero lácteo (CPSL), goma xantana (GX) y fructanos de agave (FA).

La firmeza puede interpretarse como el grado inicial de resistencia frente a una aplicación de fuerza; en el caso de alimentos suaves, como las espumas estudiadas, esta fuerza corresponde a la compresión ejercida por el paladar y la lengua del consumidor (Pascua *et al.*, 2013). En las espumas estudiadas, la firmeza inicialmente mostró una ligera disminución en los sistemas con FA, comparados con los sistemas base, pasando de 0.067 a 0.066 N, sin embargo, no resultaron significativas. La tendencia hacia la disminución de firmeza se mantuvo en los sistemas con 5% FA; al rebasar esa concentración, la firmeza mostró un aumento significativo, pasando de 0.064 a 0.073 N; esta tendencia hacia el aumento se mantuvo hasta llegar a un máximo de 0.161 N, en los sistemas con concentraciones de FA del 25%.

El trabajo adhesivo, mostró una tendencia similar a la firmeza, manteniéndose sin diferencias significativas en los sistemas con 0, 1 y 5% de FA. Concentraciones mayores a las anteriores mostraron un aumento significativo de trabajo adhesivo, hasta llegar a un máximo de -0.019 N s en los sistemas que contenían 25% de concentración de FA.

La adhesividad evalúa la fuerza requerida para remover una porción o muestra de alimento adherida a la boca utilizando la lengua. Pascua *et al.* (2013) consideran a la adhesividad como un sinónimo de pegajosidad. Wall y Huebner (1980) mencionan que la adhesividad es resultado de la interacción de grupos no polares, involucrando cadenas de grupos alifáticos o aromáticos por medio de interacciones de Van Der Waals. La β -globulina, una de las principales proteínas que componen el CPSL presenta algunas regiones fuertemente hidrofóbicas, tal y como lo mencionan Phillips y Williams (2011), por lo cual las espumas muestran cierta adhesividad inicial; la cual continuó aumentando al aumentar la concentración de FA debido a la disminución del contenido de agua en los sistemas y por lo tanto, el aumento de concentración de CPSL.

La cohesividad, al igual que los parámetros texturales anteriores, se mantuvo sin diferencias significativas a bajas concentraciones de FA en los sistemas, mostrando un aumento significativo en los sistemas cuya concentración de FA fue del 15%, con un valor de -0.089 N s. A partir de esta concentración, la cohesividad mostró una

tendencia a aumentar con respecto a la concentración de FA en los sistemas, hasta llegar a un máximo de -0.138 N s.

Cuadro 3.9. Parámetros texturales promedio de las espumas de estudio. Concentrado de proteínas de suero lácteo (CPSL), goma xantana (GX) y fructanos de agave (FA).

Sistema de estudio		Firmeza (N)	Trabajo adhesivo (N s)	Trabajo cohesivo (N s)
CPSL 15% GX 0.1%	Promedio	0.067^{d,e} (± 0.001)	-0.008^a (± 0.001)	-0.063^a (± 0.001)
	C. V. (%)	1.877	6.708	1.481
CPSL 15% GX 0.1% FA 1%	Promedio	0.066^{d,e} (± 0.003)	-0.008^a (± 0.000)	-0.065^a (± 0.003)
	C. V. (%)	3.908	5.684	4.310
CPSL 15% GX 0.1% FA 5%	Promedio	0.064^e (± 0.005)	-0.010^a (± 0.001)	-0.062^a (± 0.003)
	C. V. (%)	7.414	8.766	4.114
CPSL 15% GX 0.1% FA 10%	Promedio	0.073^d (± 0.003)	-0.008^b (± 0.001)	-0.073^a (± 0.002)
	C. V. (%)	4.266	7.245	3.201
CPSL 15% GX 0.1% FA 15%	Promedio	0.092^c (± 0.002)	-0.013^c (± 0.001)	-0.089^b (± 0.003)
	C. V. (%)	2.669	5.385	3.675
CPSL 15% GX 0.1% FA 20%	Promedio	0.107^b (± 0.002)	-0.013^d (± 0.001)	-0.101^b (± 0.002)
	C. V. (%)	1.528	7.251	2.139
CPSL 15% GX 0.1% FA 25%	Promedio	0.161^a (± 0.003)	-0.019^e (± 0.002)	-0.138^c (± 0.003)
	C. V. (%)	2.018	9.485	1.991

Desviación estándar se muestra entre paréntesis. Mismos superíndices indican que no hay diferencias significativas entre medias.

La cohesividad de un sistema es sinónimo de las fuerzas de unión internas; estas uniones son debido a la presencia de grupos polares, que contribuyen a la adhesión de proteínas a los carbohidratos, y entonces, a la cohesión del sistema que forman (Funami *et al.*, 2012; Wall y Huebner, 1980). En los sistemas estudiados, estos grupos polares se encuentran principalmente en los polisacáridos utilizados: GX y FA, por lo cual la cohesividad de los sistemas aumentó con respecto a la concentración de FA. La marcada diferencia entre la adhesividad y cohesividad de los sistemas indica un fallo adhesivo; las espumas estudiadas tienden mayormente a un comportamiento cohesivo y por lo tanto, las muestras se mantuvieron unidas en una sola masa; Pascua

et al. (2003) refieren que este comportamiento es común en geles de CPSL, quesos crema y yogurt.

Un atributo sensorial común y deseable en postres aireados, como lo son los mousses y los refrescos de helado es la cremosidad; ésta se define como un cúmulo de sensaciones típicamente asociadas con el contenido de grasa, como lo son el sabor dulce, la suavidad y la presencia de un recubrimiento aterciopelado, sin llegar a ser aceitoso, áspero o seco. Aunque es comúnmente relacionado con alimentos ricos en grasas, también puede resultar un parámetro en alimentos con hidrocoloides como la GX y FA, al ser ambos un sustituto de grasas que no modifica esta sensación de cremosidad (Pascua *et al.*, 2003). La cremosidad está relacionada con otros atributos sensoriales del alimento; con una influencia positiva o negativa sobre este atributo. La viscosidad puede presentar un efecto positivo, mientras que la adhesividad o pegajosidad, y la firmeza tienen un efecto negativo (Frøst y Janhøj, 2007). Los sistemas estudiados mostraron un aumento de mayor significancia con respecto a la viscosidad con respecto a la concentración de FA, comparado con la adhesividad y la firmeza; con lo cual se obtuvieron espumas cremosas que podrán resultar atractivas para sus futuros consumidores.

CONCLUSIONES

Se evaluó la funcionalidad de los fructanos de agave en mezcla con concentrado de proteínas de suero lácteo y goma xantana en la formación de espumas, obteniéndose que éstos resultan compatibles con el tipo de sistema disperso, al permitir la formación de las espumas, así como también a mantener éstas estables.

El factor determinante para la estabilización de los sistemas estudiados fue el control de las propiedades reológicas de la fase continua; la cual dependió del tipo de polisacárido utilizado y la concentración de éstos. El aumento de viscosidad observado en los sistemas acuosos precursores de las espumas podría ser el resultado de las interacciones entre los polisacáridos utilizados y las proteínas de suero lácteo: por un lado, se tiene la incompatibilidad termodinámica entre la goma xantana y el concentrado de proteínas de suero lácteo, así como también, la posible interacción de proteínas con los grupos hidroxilo de los fructanos de agave. El aumento de la viscosidad de los sistemas acuosos fue más evidente con la adición de fructanos de agave; esta tendencia continuó con respecto a la concentración de los fructanos.

El aumento de la viscosidad de los sistemas acuosos permitió la estabilización de las espumas formadas, al disminuir el movimiento de las burbujas de aire dispersas en el seno líquido, reducir la velocidad de difusión del aire de éstas; así como también al homogenizar y disminuir el tamaño de dichas burbujas. Esta estabilidad fue evaluada por tres métodos diferentes, con resultados congruentes entre sí. Debido a la naturaleza estática de dichas pruebas, se consideró que la viscosidad con mayor influencia fue la viscosidad η_0 , al no aplicarse ningún cizallamiento sobre la muestra y a mantenerla en relativo reposo.

La adición de fructanos de agave en los sistemas mostró un efecto sobre la densidad de las espumas, al aumentarla con respecto a la concentración de éstos; así como también al disminuir el rendimiento volumétrico de las espumas; esto se debió también al aumento de la viscosidad, la cual dificultó la incorporación de aire durante el batido; en este caso se consideró que es la viscosidad η_∞ como la responsable, al haber

cizallamiento durante la formación de la espuma; sin embargo, la disminución de rendimiento volumétrico no mostro efectos significativos.

Las propiedades texturales reflejaron un aumento con respecto a la concentración de fructanos presentes; las espumas evaluadas tendieron a ser mayormente cohesivas. Por el tipo de sistema disperso, así como su composición, se relacionaron los parámetros sensoriales evaluados con la cremosidad; este carácter cremoso aumentó en relación a la concentración de fructanos.

El uso de fructanos de agave en espumas base de concentrado de proteínas de suero lácteo y goma xantana mostraron ser una mezcla ideal de biopolímeros para la formación de sistemas estables, sin sacrificar propiedades importantes como lo son el rendimiento volumétrico y la textura.

RECOMENDACIONES

Al evaluar el uso de fructanos de agave en conjunto con dos hidrocoloides se obtuvo un sistema modelo para la formación de espumas estables y con buenas propiedades texturales; a partir de esto, es necesario continuar la experimentación orientada ahora a la formulación de un producto alimenticio. Por las características obtenidas y al estar presente una proteína láctea, se sugiere encaminar los nuevos esfuerzos a productos como café capuchino, bases para la elaboración de helado o de malteadas. Y debido a las propiedades benéficas para la salud de los fructanos, dirigir el desarrollo hacia un producto funcional. Se sugiere también realizar pruebas sensoriales para evaluar la aceptación de los productos formulados.

REFERENCIAS

- Alvarado, C., Camacho, M., Cejas, R., y Rodríguez, J. (2014). Profiling of commercial Agave fructooligosaccharides using ultrafiltration and high performance thin layer chromatography. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13, 417-427.
- Arce, V., Catalina, P., y Mallo, F. (2006). *Endocrinología*. Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de la Compostela.
- Arrizon, J., Morel, S., Gschaedler, A., y Monsan, P. (2010). Comparison of the water-soluble carbohydrate composition and fructan structures of Agave tequilana plants of different ages. *Food Chemistry*, 122, 123-130.
- Badui, S. (2006). *Química de los alimentos*. México: Pearson Educación.
- Chassenieux, C., Durand, D., Jyotishkumar, P., y Thomas, S. (2013). *Handbook of Biopolymer-Based Materials: From Blends and Composites to Gels and Complex Networks*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH y Co.
- Creus Solé, A. (2001). *Instrumentación industrial* (Octava ed.). Barcelona: Marcombo.
- Crispín-Isidro, G., Lobato-Calleros, C., Espinosa-Andrews, H., Alvarez-Ramirez, J., y Vernon-Carter, E. (2015). Effect of inulin and agave fructans addition on the rheological, microstructural and sensory properties of reduced-fat stirred yogurt. *LWT - Food Science and Technology*, 62, 438-444.
- Damodaran, S., y Paraf, A. (1997). *Food proteins and their applications*. Madison: Marcel Dekker.
- Demel, R., Dorrepaal, E., Ebskamp, M., Smeekens, J., y de Kruijf, B. (1998). Fructans interact strongly with model membranes. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1375, 36-42.
- Dickinson, E. (2005). *Food Emulsions and Foams*. Reino Unido: Woodhead Publishing

- Dickinson, E. (2010). Food emulsions and foams: Stabilization by particles. *Current Opinion in Colloid y Interface Science*, 15, 40-49.
- Dickinson, E., y Izgi, E. (1996). Foam stabilization by protein-polysaccharide complexes. *Colloids and Surfaces A*, 113, 191-201.
- Drenckhan, W., y Saint-Jalmes, A. (2015). The science of foaming. *Advances in Colloid and Interface Science*, 222, 228-259.
- Fennema, O. (2000). *Química de los alimentos*. Acribia.
- Flower, D. (1996). The lipocalin protein family : structure and function. *Biochemistry Journal*, 318, 1-14.
- Frøst, M., y Janhøj, T. (2007). Understanding creaminess. *International Dairy Journal*, 17, 298–1311.
- Funami, T., Ishihara, S., Nakauma, M., Kohyama, K., y Nishinari, K. (2012). Texture design for products using food hydrocolloids. *Food Hydrocolloids*, 26, 412-420.
- García-Ochoa, F., Santos, V., Casas, J., y Gómez, E. (2000). Xanthan gum: production, recovery, and properties. *Biotechnology Advances*, 18, 549-579.
- Graphene Limited. (20 de Noviembre de 2016). *Graphene Limited. Beverage Packanging Experts*. Obtenido de Graphene Limited. Beverage Packanging Experts: <http://grapheme.limited/>
- Hunter, T., Pugh, R., Franks, G., y Jameson, G. (2008). The role of particles in stabilising foams and emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 137, 57–81.
- Huppertz, T. (2010). Foaming properties of milk: A review of the influence of composition and processing. *International Journal of Dairy Technology*, (63), 477-488.
- Kim, H., y Lim, K. (2004). A model on the temperature dependence of critical micelle concentration. *Colloids and Surfaces A*, 235, 121–128.

- Koehler, S., Hilgenfeldt, S., y Stone, H. (2000). A generalized view of foam drainage: Experiment and theory. *Langmuir*, 16, 6327-6341.
- Lara, N., y Lescano, G. (2004). *Textura de alimentos: Medición instrumental y aplicaciones*. Quito: INIAP.
- Liszka-Skozylas, M., Ptaszek, A., y Zmudziński, D. (2014). The effect of hydrocolloids on producing stable foams based on the whey protein concentrate (WPC). *Journal of Food Engineering*, 129, 1-11.
- Luck, P., Bray, N., y Foegeding, E. (2002). Factors Determining Yield Stress and Overrun of Whey Protein Foams. *Journal of Food Science*, 67, 1677-1681.
- Mancilla-Margalli, N., y López, M. (2006). Water-Soluble Carbohydrates and Fructan Structure Patterns from Agave and Dasyliirion Species. *Journal Of Agricultural and Food Chemistry*.
- Marinova, K., Basheva, E., Nenova, B., Temelska, M., Mirarefi, A., Campbell, B., y Ivanov, I. (2009). Physico-chemical factors controlling the foamability and foam stability of milk proteins: Sodium caseinate and whey protein concentrates. *Food Hydrocolloids*, 23, 1864–1876.
- Martínez-Padilla, L., García-Mena, V., Casas-Alencáster, N., y Sosa-Herrera, M. (2014). Foaming properties of skim milk powder fortified with milk proteins. *International Dairy Journal*, 36, 21–28.
- Martínez-Padilla, L., García-Rivera, J., Romero-Arreola, V., y Casas-Alencáster, N. (2015). Effects of xanthan gum rheology on the foaming properties of whey protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, 156, 22–30.
- Matyjaszewski , K., y Möller , M. (2012). *Polymer Science: A Comprehensive Reference*. Amsterdam: Elsevier.
- Mengual, O., Meunier, G., Cayre´, I., Puech, K., y Snabre, P. (1999). TURBISCAN MA 2000: multiple light scattering measurement for concentrated emulsion and suspension instability analysis. *Talanta*, 50, 445–456.

- Naranjo-Delgado, M., Linares-Fernández, J., y Rodríguez-Patino, J. (1995). Stability and mechanical strength of aqueous foams containing food proteins. *Colloids and Surfaces*, 99, 65-78.
- Narchi, I., Vial, C., y Djelveh, G. (2009). Effect of protein–polysaccharide mixtures on the continuous manufacturing of foamed food products. *Food Hydrocolloids*, 23, 188–201.
- Nicolleti-Tellis, V. (2012). *Biopolymer engineering in food processing*. Boca Raton: CRC Press.
- NMX-F-317-S-1978. Determinación de pH en alimentos.
- Parra Huertas, R. (2009). Lactosuero: Importancia en la industria de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 62, 4967-4982.
- Pascua, Y., Koç, H., y Foegeding, E. (2013). Food structure: Roles of mechanical properties and oral processing in determining sensory texture of soft materials. *Current Opinion in Colloid y Interface Science*, 18, 324–333.
- Perez, A., Carrera Sánchez, C., Rodríguez Patino, J., Rubiolo, A., y Santiago, L. (2010). Milk whey proteins and xanthan gum interactions in solution and at the air–water interface: A rheokinetic study. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 81, 50–57.
- Phillips , G., y Williams, P. (2011). *Handbook of Food Proteins*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Phillips, G., y Williams , P. (2009). *Handbook of Hydrocolloids* (Segunda ed.). Boca Raton: Woodhead Publishing.
- Praznik, W., Löppert, R., Cruz Rubio, J., Zangger, K., y Huber, A. (2013). Structure of fructo-oligosaccharides from leaves and stem of Agave tequilana Weber var. azul. *Carbohydrate Research*, 381, 64-73.

- Rao, M. (2007). *Rheology of Fluid and Semisolid Foods. Principles and Applications*. (Segunda ed.). Nueva York: Springer.
- Rio, E., Drenckhan, W., Salonen, A., y Langevin, D. (2014). Unusually stable liquid foams. *Advances in Colloid and Interface Science*, 205, 74–86.
- Ritsema , T., y Smeekens, S. (2003). Fructans: beneficial for plants and humans. *Current Opinion in Plant Biology*, 6, 223–230.
- Rodriguez Furlán, L., Aldrete Herrera, P., Pérez Padilla, A., Ortiz Basurto, R., y Campderrós , M. (2014). Assessment of agave fructans as lyoprotectants of bovine plasma proteins concentrated by ultrafiltration. *Food Research International*, 56, 146–158.
- Rosen, M. (2004). *Surfactans and interfacial fenomena* (Tercera ed.). Hoboken: John Wiley y Sons.
- Sosa-Herrera, M., Martínez-Padilla, L., Delgado-Reyes, V., y Torres-Robledo, A. (2016). Effect of agave fructans on bulk and surface properties of sodium caseinate in aqueous media. *Food Hydrocolloids*, 60, 199-205.
- Toriz, G., Delgado, E., y Zúñiga, V. (2007). A proposed chemical structure for fructans from blue agave plant (Tequilana Weber var. azul). *e-Gnosis*, (5).
- Vaclavik, V., y Christian, E. (2008). *Essentials of Food Science* (Tercera ed.). Nueva York: Springer.
- Vereyken, I., van Kuik, J., Evers, T., Rijken, P., y de Kruijff, B. (2003). Structural Requirements of the Fructan-Lipid Interaction. *Biophysical Journal*, 84, 3147–3154.
- Wall, J., y Huebner, F. (1980). Adhesion and Cohesion. U.S. Departament of Agriculture.
- Yasuda, K. (2006). A multi-mode viscosity model and its applicability to non-Newtonian fluids. *Journal of Textile Engineering*, 52, 171-173.

Zabler, S. (2014). Liquid and solid foams. General introduction: Liquid and solid (materials, main properties and applications). *Comptes Rendus Physique*, 15, 653–661.