



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**Efecto de los fructanos de agave en el comportamiento al  
flujo y estabilidad de emulsiones con caseinato de sodio y  
goma xantana**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERA EN ALIMENTOS**

**P R E S E N T A :**

**MARIA DE LOS ANGELES AVILA ORTEGA**

**ASESORA: DRA. MARÍA GUADALUPE SOSA HERRERA  
COASESORA: DRA. LAURA PATRICIA MARTÍNEZ PADILLA**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2016**



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**

U.N.A.M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN  
ASUNTO: VOTO APROBATORIO



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

**ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO  
Jefe 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 la: **Tesis y Examen Profesional**

**Efectos de los fructanos de agave en el comportamiento al flujo y estabilidad de emulsiones con caseinato de sodio y goma xantana.**

Que presenta la pasante: **Maria de los Angeles Avila Ortega**

Con número de cuenta: **308161287** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería 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 10 de Agosto de 2016.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	I.A. Patricia Muñoz Aguilar	
<b>VOCAL</b>	Dra. María Guadalupe Sosa Herrera	
<b>SECRETARIO</b>	Dra. Virginia Agustina Delgado Reyes	
<b>1er. SUPLENTE</b>	M en C. Enrique Fuentes Prado	
<b>2do. SUPLENTE</b>	I.Q. Guillermo Martínez Morua	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

## **AGRADECIMIENTOS**

*Gracias a mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas. A mi madre, María Isabel Avila Ortega, por estar dispuesta a acompañarme cada larga y agotadora noche de estudio, y a mi tío Salvador Avila Ortega, por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, gracias por cada consejo y cada una de sus palabras que me han guiado durante mi vida*

*A mi abuelita Ursula Ortega Mondragón por enseñarme tantas cosas vitales para mi vida y encaminarme por el buen sendero.*

*Agradezco sinceramente, a mis asesoras de tesis, la Dra. María Guadalupe Sosa Herrera y la Dra. Laura Patricia Martínez Padilla, por sus conocimientos, sus orientaciones, su forma de trabajar, su persistencia, paciencia y motivación, que han sido fundamentales para la realización de este trabajo.*

*A mis amigas, Gabriela Ríos Ramírez y Denisse Hernández Jiménez, que me brindaron su apoyo siempre que lo necesite. Ustedes me acompañaron a lo largo de este proceso, gracias por confiar y creer en mí, y haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto que nunca voy a olvidar.*

*A mi novio, Juan Manuel Trejo Romero, por la ayuda brindada en este lapso de tiempo, por haber estado en los momentos y situaciones difíciles, por su motivación y compañía.*

*Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IN11821-4 Propiedades reológicas y fisicoquímicas de biomoléculas funcionales de interés en la formación de sistemas coloidales alimenticios, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.*

# ÍNDICE

	Página
Índice de cuadros.	i
Índice de figuras	ii
Resumen	iv
Introducción	v
1. Antecedentes	1
1.1 Emulsiones	1
1.1.1 Estabilidad	1
1.1.2 Reología de emulsiones	6
1.2 Biomoléculas en emulsiones	8
1.2.1 Proteínas	9
1.2.1.1 Caseinato de sodio	10
1.2.2 Polisacáridos	12
1.2.2.1 Goma xantana	13
1.2.2.2 Fructanos de agave	15
1.3 Interacción polisacárido-proteína	16
2. Metodología	20
2.1 Materiales y métodos	20
2.1.1 Materiales	20
2.1.2 Métodos	21
3. Resultados y discusión	26
3.1 Distribución de tamaño de partícula de emulsiones	26
3.1.1 Fructanos de agave	26
3.1.2 Fructanos de agave-caseinato de sodio	29
3.1.3 Fructanos de agave-caseinato de sodio-goma xantana	31
3.1.4 Fructanos de agave-xantana	36
3.2 Comportamiento al flujo de sistemas acuosos y de emulsiones	38
3.2.1 Comportamiento al flujo de sistemas acuosos	39
3.2.1.1 Fructanos de agave-caseinato de sodio-goma xantana	39
3.2.1.2 Fructanos de agave-goma xantana	42
3.2.2 Comportamiento al flujo de emulsiones	42
3.2.2.1 Fructanos de agave-caseinato de sodio-goma xantana	42
3.2.2.2 Fructanos de agave-goma xantana	47
3.3 Estabilidad de emulsiones por transmisión-retrodispersión de luz	48
3.3.1 Fructanos de agave	49
3.3.2 Fructanos de agave-caseinato de sodio	50
3.3.3 Fructanos de agave-caseinato de sodio-goma xantana	52
3.3.4 Fructanos de agave-goma xantana	54
Conclusiones	55
Referencias	56

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1.1	Grupos de la caseína, peso molecular y grupos fosfato	11
1.2	Aplicaciones en alimentos de la goma xantana	14
3.1	Modas de los diámetros ( $\mu\text{m}$ ) de partícula de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave	28
3.2	Valores al 10, 50 y 90% de fracción acumulada del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave	28
3.3	Modas de los diámetros ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio	29
3.4	Valores al 10, 50 y 90% de fracción acumulada del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio	31
3.5	Modas de los diámetros ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio y goma xantana	33
3.6	Valores al 10, 50 y 90% de fracción acumulada del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio y goma xantana	33
3.7	Modas de los diámetros ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio y goma xantana	34
3.8	Valores al 10, 50 y 90% de fracción acumulada del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio y goma xantana	36
3.9	Modas de los diámetros ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con goma xantana	38
3.10	Valores al 10, 50 y 90% de fracción acumulada del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con goma xantana	38
3.11	Parámetros reológicos de los sistemas acuosos elaborados con diferentes concentraciones de goma xantana en mezcla con fructanos de agave y caseinato de sodio, evaluadas en un intervalo de velocidad de cizalla de $4-500 \text{ s}^{-1}$	40
3.12	Parámetros reológicos para el modelo de la potencia de los sistemas acuosos elaborados con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio y goma xantana, evaluadas en un intervalo de velocidad de cizalla de $4-500 \text{ s}^{-1}$	41
3.13	Parámetros reológicos para el modelo de Carreau de los sistemas acuosos elaborados con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con goma xantana, evaluadas en un intervalo de velocidad de cizalla de $4-500 \text{ s}^{-1}$	43

3.14	Parámetros reológicos para el modelo Herschel-Bulkley de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de goma xantana en mezcla con fructanos de agave y caseinato de sodio, evaluadas en un intervalo de velocidad de cizalla de 0.1-500 s <sup>-1</sup>	45
3.15	Parámetros reológicos para el modelo Herschel-Bulkley de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con goma xantana y caseinato de sodio, evaluadas en un intervalo de velocidad de cizalla de 0.1-500 s <sup>-1</sup>	46
3.16	Parámetros reológicos para el modelo Herschel-Bulkley de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con goma xantana, evaluadas en un intervalo de velocidad de cizalla de 0.1-500 s <sup>-1</sup>	48
3.17	Espesor de clarificado y tiempo de estabilidad de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave	50
3.18	Velocidad de clarificado de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio	52
3.19	Espesor de clarificado y tiempo de estabilidad de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de goma xantana en mezcla con fructanos de agave y caseinato de sodio	53
3.20	Espesor de clarificado y tiempo de estabilidad de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio y goma xantana	53
3.21	Espesor de clarificado y tiempo de estabilidad de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con goma xantana	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Diagrama esquemático de la floculación por agotamiento	3
1.2	Coalescencia de gotas	4
1.3	Coalescencia parcial	4
1.4	Inversión de fases	5
1.5	Cremado de emulsiones	5
1.6	Comportamiento al flujo de emulsiones que contienen partículas floculadas	7
1.7	Submicela de la caseína	11
1.8	Unidad de replicación de la goma xantana	13
1.9	Estructura de los fructanos de agave tipo levano, enlaces β (2-6) fructosil fructosa	15
1.10	Comportamiento de las mezclas polisacárido-proteína	18
1.11	Mecanismos de adsorción y/o interacciones entre biopolímeros	19
2.1	Gráfico de la distribución de tamaño de partícula	23
2.2	Principio de funcionamiento del turbiscan	24
2.3	Perfil de retrodispersión de luz	24
2.4	Curva de flujo para identificar la dependencia de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla	25
3.1	Distribución de tamaño de partícula para las emulsiones elaboradas con	

	diferentes concentraciones de fructanos de agave	27
3.2	Distribución de tamaño de partícula para las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio	30
3.3	Distribución de tamaño de partícula para las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de goma xantana en mezcla con caseinato de sodio y fructanos de agave	32
3.4	Distribución de tamaño de partícula para las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio y goma xantana	35
3.5	Distribución de tamaño de partícula para las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con goma xantana	37
3.6	Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de los sistemas acuosos elaborados con diferentes concentraciones de goma xantana en mezcla con fructanos de agave y caseinato de sodio	40
3.7	Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de los sistemas acuosos elaborados con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio y goma xantana	41
3.8	Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de los sistemas acuosos elaborados con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con goma xantana	43
3.9	Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de los sistemas acuosos y sus emulsiones correspondientes elaborados con diferentes concentraciones de goma xantana en mezcla con caseinato de sodio y fructanos de agave	44
3.10	Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de los sistemas acuosos y sus emulsiones correspondientes elaborados con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio y goma xantana	46
3.11	Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de los sistemas acuosos y sus emulsiones correspondientes elaborados con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con goma xantana	47
3.12	Perfil de retrodispersión de luz de las emulsiones elaboradas	49
3.10	Cinética de clarificado de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio	51



## RESUMEN

En la presente investigación se estudió el comportamiento al flujo de sistemas acuosos preparados con mezclas de fructanos de agave (1, 3, 5 y 10%), caseinato de sodio (1%) y goma xantana (0.03, 0.05, 0.1 y 0.25%), así como de emulsiones aceite en agua con 30% de aceite puro de canola. En cuanto a las emulsiones se evaluó la distribución del tamaño de partícula, con la finalidad de relacionar dichas propiedades con la estabilidad de las emulsiones.

Para la determinación de la distribución de tamaño de partícula se empleó el método de dispersión dinámica de luz (Granulómetro 930, Cilas) con y sin la aplicación de ultrasonido durante la medición; el comportamiento al flujo se evaluó mediante pruebas de cizalla rotacional (Reómetro MCR301, Anton Paar Physica) con una geometría de cono de 1° de ángulo y 75 mm de diámetro; y la estabilidad se determinó por transmisión-retrodispersión de luz (Turbiscan MA2000, Formulacion).

Del análisis de la distribución del tamaño de partícula se observó que a la concentración de 5% de fructanos de agave, los diámetros de los glóbulos tienden a ser menores, sin embargo, en combinación con caseinato de sodio, es éste el que determina la distribución y el tamaño de los glóbulos.

En cuanto al comportamiento al flujo, la goma xantana es quien domina el comportamiento reológico de los sistemas acuosos, y en las emulsiones, es la fase dispersa la que determina el comportamiento reológico de las mismas.

Al evaluar la estabilidad de las emulsiones se logró establecer que los fructanos de agave y la goma xantana mejoran dicha estabilidad, disminuyendo la velocidad en la que se forma el clarificado y el espesor del mismo, siendo la concentración de 0.03% de goma xantana la que presentó una menor zona de clarificado en comparación con las otras concentraciones empleadas.

## INTRODUCCIÓN

Dentro de las propiedades importantes de las emulsiones se encuentran su estabilidad y su comportamiento reológico. La primera se refiere a la vida útil del producto, por su parte, el comportamiento reológico es importante para el desarrollo de la formulación y las características sensoriales, las condiciones de proceso y el control de calidad (Ruttarattanamongkol *et al.*, 2015). Alimentos de consumo habitual, como la mayonesa, los aderezos y los postres, son emulsiones aceite en agua. Si se consideran los ingredientes de estas formulaciones, el emulsionante tiene un papel esencial en estos productos, dado que confiere a las emulsiones la estabilidad requerida mediante la formación de una barrera protectora alrededor de las gotas de aceite (Dickinson, 1999).

La estabilización de emulsiones se puede generar por tres mecanismos:

- Formación de una capa o película de emulsionante alrededor de las gotas individuales de líquido suspendido.
- Existencia o formación de una capa electrostáticamente cargada en la superficie de las gotas individuales.
- Incremento en la viscosidad del medio de dispersión. Al aumentar la viscosidad del dispersante, las posibilidades de las partículas de aglomerarse son menores y por tanto se reduce la posibilidad de sedimentación de las mismas o formación de cremado (Dickinson, 1999).

En las emulsiones alimenticias el papel emulsionante estabilizador es desempeñado por una gran variedad de sustancias, tales como proteínas, fosfolípidos y polisacáridos, destacando las proteínas de la leche, que, en su forma soluble y dispersa, tienen excelentes propiedades emulsionantes. Uno de los ingredientes de las proteínas de la leche más convenientes es el caseinato de sodio, el cual, debido a su buena solubilidad, su actividad de superficie, resistencia al calor, y retención de agua, es empleado extensamente como formador de emulsiones en alimentos como el helado, la crema para café, los licores de crema y crema batida. Las caseínas que lo constituyen se adsorben fuertemente en las interfases de los fluidos inmiscibles. Esto sucede durante la emulsificación cuando las

moléculas de caseína se asocian rápidamente con la superficie de las gotas de aceite recién formadas generadas durante la homogenización (Dickinson, 1999).

Por otro lado, los polisacáridos en emulsiones, al ser de naturaleza hidrófila generalmente permanecen en la fase acuosa y así ayudan en el control de la reología actuando como agentes estabilizantes (Ghosh y Bandyopadhyay, 2012). Dentro de los polisacáridos empleados en emulsiones destaca la goma xantana, que debido a su comportamiento fluidificante a bajas velocidades de cizalla proporciona una alta viscosidad que resiste el movimiento browniano de las gotas de aceite y mantiene la estabilidad de una emulsión. Estas características reológicas hacen del uso de la goma xantana muy adecuado para la elaboración de aderezos para ensaladas, mayonesas, entre otros (Zhao *et al.*, 2012). Por su parte los fructanos de agave obtenidos de la planta *Agave Tequilana* Weber var. azul, que son cultivados en varios lugares de México para la fabricación de tequila han demostrado en estudios recientes que la estructura molecular de éstos es una mezcla compleja de fructanos altamente ramificados (Toriz *et al.*, 2007). Esta conformación particular provee propiedades y aplicaciones en la industria de los alimentos (Ponce *et al.*, 2008); además de poseer propiedades prebióticas con efectos sobre el metabolismo de la glucosa, el peso y el desarrollo de masa corporal (Ulloa *et al.*, 2010), como ejemplo de aplicación en alimentos se ha empleado en productos lácteos como el yogurt donde se ha demostrado que tienden a cubrir las micelas de caseína formadas (Crispín-Isidro, *et al.*, 2014).

Los complejos formados por la interacción polisacárido-proteína exhiben un extenso intervalo de propiedades, como es la actividad de superficie para estabilizar interfases agua-aire o aceite-agua, incremento de la viscosidad y propiedades gelificantes. Las propiedades de interfase de estos complejos ayudan a impartir estabilidad dentro de emulsiones alimenticias (Ghosh y Bandyopadhyay, 2012). Basado en esto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de los fructanos de agave en emulsiones aceite en agua elaboradas a base de caseinato de sodio en combinación con goma xantana, sobre el comportamiento al flujo de éstas y su estabilidad, considerando además las propiedades de flujo de los sistemas acuosos que las constituyen, para valorar su aplicación en la elaboración de emulsiones alimenticias con una mayor estabilidad.

## I. ANTECEDENTES

### 1.1 Emulsiones

Una emulsión es una dispersión uniforme de glóbulos líquidos dentro de una matriz continua de un segundo líquido inmisible, estabilizada por moléculas de superficie activa (Ghosh y Bandyopadhyay, 2012). Las emulsiones formadas por un sistema que consiste en glóbulos de aceite dispersas en una fase acuosa son llamadas aceite en agua, por ejemplo, mayonesa, leche, crema, sopas y salsas. Un sistema que consiste en glóbulos de agua dispersas en aceite es llamado agua en aceite, por ejemplo, margarina y mantequilla. La sustancia que se encuentra en gotas en una emulsión es conocida como fase interna o dispersa, mientras que la fase que es el líquido que las rodea, es llamada fase continua o externa (McClements, 2004).

Las emulsiones alimenticias aceite en agua son generalmente elaboradas usando molinos coloidales u homogeneizadores de alta presión o alta velocidad. En la formación, la mezcla de aceite-agua pasa a través de un espacio estrecho entre el rotor y el estator (parte fija de una máquina rotativa de alta velocidad y uno de los elementos fundamentales de la transmisión de potencia), en el que los esfuerzos impuestos sobre la mezcla son suficientes para romper el aceite en gotas (Larsson y Friberg, 1990). Vinculado a la formación de emulsiones alimenticias es necesario para su estabilización el empleo de un emulsionante, varios emulsionantes son utilizados en la industria de los alimentos para contribuir con ésta, comercialmente, los emulsionantes son frecuentemente promovidos con base en su habilidad para disminuir la tensión en la interfase aceite-agua (Darling y Birkett, 1986).

#### 1.1.1 Estabilidad

El término estabilidad de una emulsión se refiere a la habilidad de la emulsión para resistir cambios en sus propiedades a través del tiempo. Una emulsión puede volverse inestable debido a un número diferente de procesos físicos y químicos. La inestabilidad física resulta de una alteración en la distribución espacial o en la organización estructural de las moléculas, mientras que la inestabilidad química resulta de una alteración en la estructura química de las moléculas. Cremado, floculación, coalescencia, coalescencia parcial e

inversión de fases son ejemplos de procesos de inestabilidad física, mientras que oxidación e hidrólisis son ejemplos comunes de inestabilidad química. Dentro de la inestabilidad física es importante distinguir entre estabilidad termodinámica y estabilidad cinética. La primera indica si el proceso se realizará o no, mientras que la otra se refiere a la velocidad a la que el proceso ocurrirá en caso de hacerlo. Todas las emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables y eventualmente se descomponen después de un tiempo. Por esta razón, la estabilidad cinética es responsable en gran medida de un intervalo de propiedades exhibidas por diferentes emulsiones (McClements, 2004).

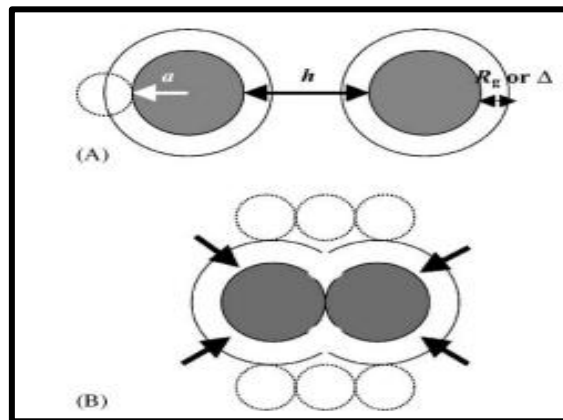
El origen de la inestabilidad termodinámica se puede demostrar por comparación de la energía libre de un sistema que consiste en una fase oleosa y una acuosa antes y después de la emulsificación. Por definición, la diferencia de la energía libre ( $\Delta G_I$ ) en la interfase entre los estados inicial y final es equivalente al incremento en el área superficial ( $\Delta A$ ) entre las fases acuosas y oleosas multiplicada por la tensión en la interfase ( $\gamma$ ):

$$\Delta G_{Formación} = \gamma \Delta A \quad (1.1)$$

El cambio en la energía libre en la interfase ( $\gamma \Delta A$ ) es siempre positiva debido a que el área en la interface incrementa después de la homogenización y se opone a la formación de la emulsión (McClements, 2004).

La cinética de una emulsión proporciona información de cómo las propiedades cambian con el tiempo, el tipo de cambios que ocurren o los mecanismos físicos responsables de estos cambios. Conceptualmente, la estabilidad cinética de una emulsión puede ser atribuida a la energía de activación que debe ser superior a la energía térmica del sistema, antes de que se pueda alcanzar el estado más termodinámicamente favorable. La estabilidad cinética de una emulsión sólo puede ser entendida con referencia a su naturaleza dinámica. Las gotas en una emulsión están en un estado de continuo movimiento y frecuentemente colisionan unas con otras, debido al movimiento Browniano, gravedad o la aplicación de fuerzas externas. Si las gotas se separan, permanecen libremente asociadas una con otra o se fusionan después de una colisión. La estabilidad cinética de las emulsiones está determinada por las interacciones dinámicas de los glóbulos que contienen (McClements, 2004).

Existen diferentes mecanismos en los que se pueden dar las interacciones entre las gotas de una emulsión, dos tipos de agregación en las emulsiones alimenticias son la floculación y la coalescencia. La floculación es el proceso donde dos o más gotas juntas forman un agregado, en el que las gotas mantienen su integridad individual (McClements, 2004). Existe la floculación por agotamiento que se da debido a que existen macromoléculas que no son adsorbidas en la interfase. Como la superficie de las gotas se está acercando, el espacio entre las superficies es menor que el diámetro de las macromoléculas. La concentración de las macromoléculas no adsorbidas aumenta fuera del espacio entre las gotas y crea un gradiente de presión osmótica, como consecuencia de ello las partículas coloidales son empujadas en contacto (Figura 1.1) (Radford y Dickinson, 2004).

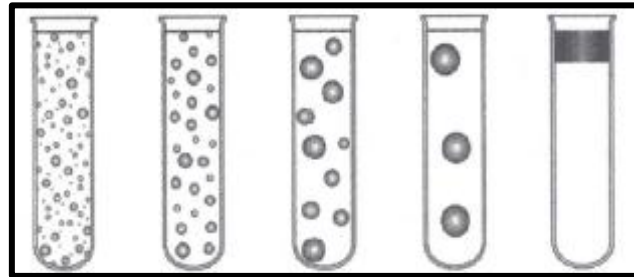


*Figura 1.1* Diagrama esquemático que ilustra la floculación por agotamiento. (A) dos gotas grandes (radio  $a$ ) son separadas por una distancia de superficie-superficie  $h$ , posee una capa de agotamiento ( $\Delta$ ) del radio  $R_g$  de especies no adsorbidas. (B) la presión osmótica del medio externo presiona las gotas en dirección de las flechas (Radford y Dickinson, 2004).

Hay también floculación por puenteo que se da debido a que los biopolímeros pueden formar puentes entre dos partículas. Es un proceso físico que se presenta debido a la insuficiente cantidad de biopolímero para cubrir completamente los glóbulos de la fase dispersa, provocando que estos últimos queden libres para su aglomeración (Dickinson, 1998).

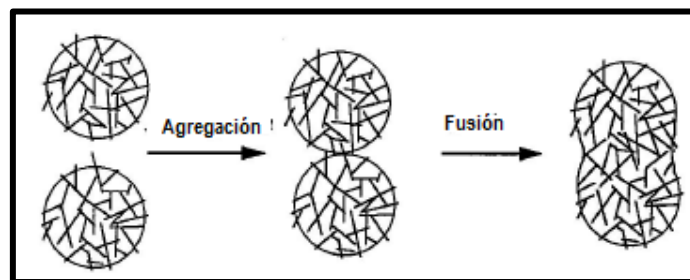
Por otro lado, la coalescencia es el proceso donde dos o más gotas se funden juntas para formar un solo glóbulo grande (Figura 1.2). Es el resultado dónde dos o más glóbulos de la emulsión entran en contacto molecular, este proceso puede ocurrir cuando las gotas están

tan cercanas una de la otra que las membranas se rompen. La velocidad a la que procede la coalescencia, y los mecanismos físicos por los que ocurre es altamente dependiente de la naturaleza del emulsificante empleado para estabilizar el sistema, en general la susceptibilidad de las gotas a coalescer es determinado por la naturaleza de las fuerzas que actúan en y entre las gotas (gravitacionales, hidrodinámicas y mecánicas) y de la resistencia de la membrana a la ruptura.



*Figura 1.2* Coalescencia de gotas (McClements, 2004).

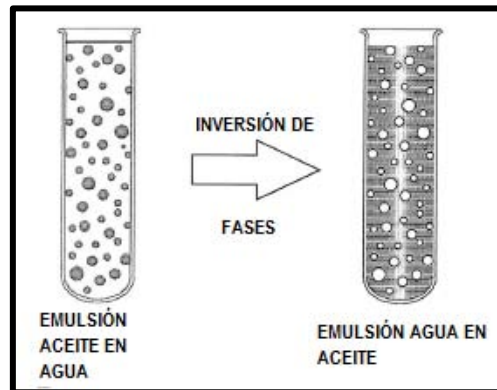
Mientras que la coalescencia parcial ocurre cuando dos o más gotas de aceite parcialmente cristalinas entran en contacto y forman un agregado irregular (Figura 1.3). Ésta se inicia cuando un cristal sólido de aceite proveniente de una gota penetra en la porción líquida de aceite de otra gota. Es afectada por los mismos factores que influyen a la coalescencia normal, incluyendo la frecuencia de colisión, las interacciones coloidales e hidrodinámicas, la tensión en la interfase y la membrana viscoelástica (McClements, 2004).



*Figura. 1.3* Coalescencia parcial (McClements, 2004).

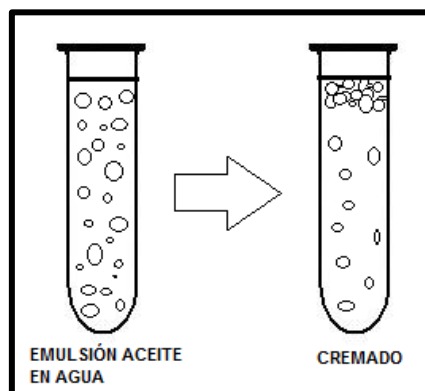
La inversión de fases es el proceso donde el sistema cambia de emulsiones aceite en agua a emulsiones agua en aceite (Figura 1.4). Es comúnmente desencadenada por alguna alteración en la composición o condiciones ambientales de una emulsión, por ejemplo:

fracción volumen de la fase dispersa, tipo de emulsificante, concentración del emulsificante, temperatura o agitación mecánica (McClements, 2004).



*Figura 1.4* La inversión de fases implica la conversión de una emulsión aceite en agua a una emulsión agua en aceite y viceversa (McClements, 2004).

Para una emulsión aceite en agua, el cremado es el movimiento de las gotas de aceite por efecto de la gravedad o en una centrífuga, en la que se forma una capa en la superficie de la muestra, pero no se presenta un cambio en la distribución del tamaño de partícula (Figura 1.5). Inicialmente, se desarrolla un gradiente de concentración de las gotas en dirección vertical, seguido por la aparición de un límite entre la capa superior de crema y la capa inferior de emulsión empobrecida (Binks, 1998).



*Figura 1.5* Cremado de emulsiones aceite en agua (Binks, 1998).



### 1.1.2 Reología de emulsiones

Las propiedades reológicas de emulsiones son importantes para la ciencia básica y para diferentes aplicaciones. A nivel fundamental, la determinación de las propiedades reológicas puede brindar información detallada acerca de la estructura de una emulsión, estados de agregación de las gotas, e interacciones entre las mismas. A nivel industrial o comercial el comportamiento reológico es muy útil para desarrollar productos para el consumidor, para describir atributos como “cremosidad”, “untabilidad”, “cuerpo” y “sensación en la piel” (Dickinson, 1998). Las emulsiones alimenticias exhiben un amplio intervalo de comportamientos reológicos, desde líquidos de baja viscosidad hasta sólidos bastante rígidos, que depende de la viscosidad de la fase continua, de la concentración de la fase dispersa, la concentración de los ingredientes que contiene, así como de las condiciones de procesamiento y almacenamiento (McClemets, 2004).

La viscosidad de un líquido incrementa con la adición de partículas esféricas debido a que las partículas perturban el flujo natural del fluido causando una gran energía de disipación debido a la fricción. Einstein derivó una ecuación que relaciona la viscosidad de una suspensión de esferas rígidas en su composición:

$$\eta = \eta_0(1 + 2.5\phi) \quad (1.2)$$

Dónde  $\eta_0$  es la viscosidad del líquido alrededor de los glóbulos y  $\phi$  es la fracción volumen de la fase dispersa. Esta ecuación asume que el líquido es newtoniano y las partículas son rígidas y esféricas, y no hay interacción entre partículas. El valor de  $\eta$  tiende a ser diferente de 2.5 si todos los supuestos de la teoría de Einstein se cumplen. Esto puede ocurrir si las partículas están eléctricamente cargadas o si no son esféricas o son deformables, o si la superficie de la partícula es recubierta por una capa de moléculas (solvente, surfactante o polímero) de espesor significativo comparado con el tamaño de partícula (Dickinson, 1998). La reología de emulsiones se relaciona con la fase dispersa cuando las gotas de una emulsión son muy pequeñas, y no muy deformables, y especialmente cuando el volumen de la fase dispersa es pequeño (alrededor de una fracción volumen de 0.3) y las partículas están floculadas (Barnes, 2004).

Las emulsiones no floculadas, sin la adición de polímeros muestran el efecto de la fracción volumen, exhibiendo que la reología del sistema puede ser representada por el modelo de la ley de la potencia:

$$\sigma = K\dot{\gamma}^n \quad (1.3)$$

Dónde  $\sigma$  es el esfuerzo de cizalla,  $\dot{\gamma}$  la velocidad de cizalla, K el índice de consistencia, y n el índice de comportamiento al flujo. Los sistemas con una fracción volumen menor o igual a 0.4 se comportan como fluidos newtonianos, mientras que, en las que la fracción volumen es mayor a 0.4 tienden al comportamiento fluidificante a la cizalla (Dickinson, 1998).

Las emulsiones con agregados o partículas floculadas tienden a exhibir un pronunciado comportamiento fluidificante a la cizalla. A bajas velocidades de cizallamiento, las fuerzas no son lo suficientemente grandes para romper los enlaces que mantienen las partículas entre sí, y los flóculos actúan como partículas de un tamaño fijo, resultando en una viscosidad constante. Conforme incrementa la velocidad de cizalla, las fuerzas hidrodinámicas son lo suficientemente grandes para causar la ruptura de los flóculos resultando en una disminución de la viscosidad (Figura 1.6) (McClements, 2004).

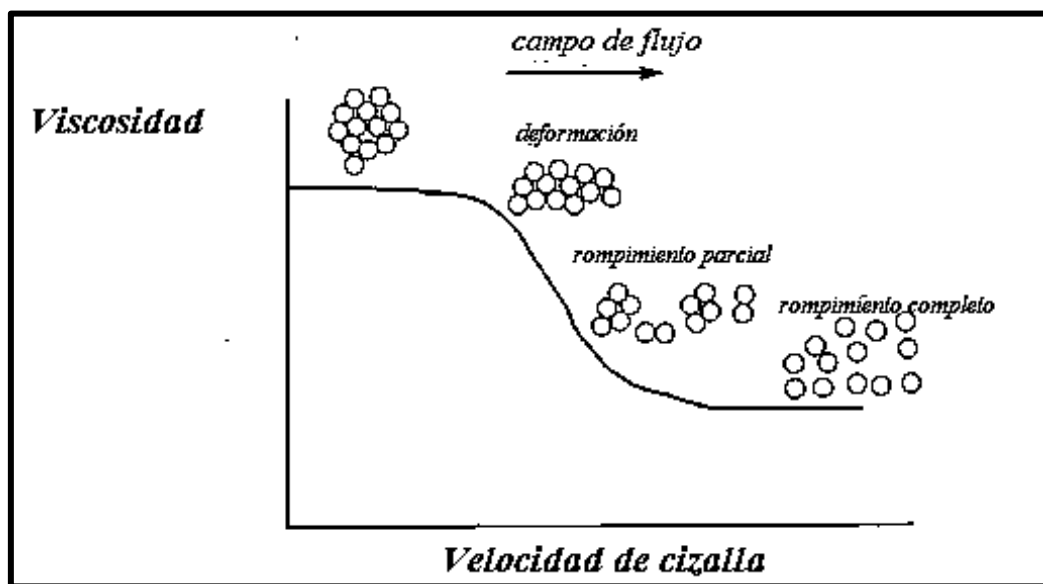


Figura 1.6 Comportamiento al flujo de una emulsión que contiene partículas floculadas (McClements, 2004).

La presencia de una capa adsorbida de polímero (o surfactante) en la superficie de la partícula puede conducir a un aumento de la viscosidad de una dispersión diluida por un incremento de la fracción volumen efectiva de la fase dispersa (Dickinson, 1998). Además, incrementa el radio hidrodinámico de las gotas de aceite y la elasticidad de las mismas, lo que afecta la deformación de las gotas en reposo y durante el flujo (Barnes, 2004). Las emulsiones que presentan floculación por agotamiento debido a un polímero no adsorbido en la interfase tienden a presentar un comportamiento al flujo no newtoniano debido a la formación de flóculos que constituyen una red tridimensional, dichas emulsiones presentan un comportamiento reológico dependiente del tiempo, esto puede ser atribuido a la disgregación de los flóculos seguido por la reconstitución de la red que forman los mismos a medida que transcurre el tiempo (Dickinson, 1998).

La viscosidad de una emulsión aumenta con la fracción volumen de la fase dispersa, a bajas concentraciones de gotas dispersas este incremento es linealmente dependiente de ésta y por encima de una fracción volumen crítica de la fase dispersa las gotas se compactan de forma tan estrecha que no fluyen fácilmente, entonces la emulsión tiene propiedades semejantes a las de un sólido (McClements, 2004).

La carga de las partículas de una emulsión puede influenciar las propiedades de la misma en diferentes formas. Primero, la carga determina si las gotas están agregadas o disgregadas. Segundo, la carga de las gotas influye en la reología debido al efecto primario electroviscoso; como una gota cargada se mueve a través del fluido, la nube de contraiones alrededor se distorsiona, causando una atracción entre la carga de una gota y la nube de contraiones que está ligeramente detrás de ella. Esta atracción se opone al movimiento de las gotas e incrementa la viscosidad de la emulsión ya que se requiere más energía para que las gotas se muevan a la misma velocidad que las gotas no cargadas (McClements, 2004).

## 1.2 Biomoléculas en emulsiones

La estabilización de emulsiones por biomoléculas tiene una amplia importancia en prácticamente todos los sectores de la tecnología de las emulsiones alimenticias, ya que la grasa en contacto con una fase acuosa produce una alta tensión en la interfase. En este

sentido, las biomoléculas pueden actuar como emulsionantes reduciendo este alto estado de energía a un sistema bajo en energía, usualmente se distinguen por tener afinidad por las fases acuosas y lipídicas ya que tienen partes hidrofóbicas e hidrofílicas en su molécula (Charalambous y Doxastakis, 1989). Son considerados emulsionantes de alto peso molecular en los que predominan las proteínas. Las proteínas para ejercer su función emulsionante siguen un mecanismo en tres etapas. La primera, de su transporte desde la fase continua a la interfase, la segunda de su adsorción en la misma y la tercera en una reorganización de su estructura en la interfase (Muñoz *et al.*, 2007).

Los estabilizantes, por su parte, son compuestos químicos de naturaleza macromolecular que hidratados en la fase acuosa confieren a la emulsión una estabilidad física durante un tiempo prolongado. Un gran número de materiales son empleados como espesantes de la fase continua de las emulsiones, destacando entre ellos los polisacáridos que actúan restringiendo la movilidad de las gotas de la fase dispersa, gracias al aumento de la viscosidad de la fase continua (Muñoz *et al.*, 2007).

### 1.2.1 Proteínas

Las proteínas son macromoléculas formadas por cadenas lineales de aminoácidos unidas por enlaces peptídicos, y se pueden clasificar como fibrosas y globulares. Las primeras forman largas cadenas que se extienden, tienen una estructura secundaria característica que suele ser simple y repetitiva como un enrollamiento helicoidal. Carecen por completo de estructura terciaria, estas proteínas son insolubles, aunque existen tratamientos que las solubilizan. Por su lado, las proteínas globulares son de estructura terciaria y cuaternaria, las cadenas de aminoácidos están replegadas existiendo multitud de interacciones entre puntos muy distantes de la cadena, lo que les da forma de globo. Suelen ser solubles en agua ya que como consecuencia del arrollamiento exponen al disolvente las partes más polares mientras que las hidrófobas quedan hacia el interior de la proteína (Fernández-Sevilla, 2005).

Las proteínas contienen residuos de aminoácidos hidrófobos e hidrófilos, estos aminoácidos entran en la interfase de dos líquidos inmiscibles, como es el caso de las

emulsiones y cubren la interfase, proporcionando una pérdida de energía del sistema (Larsson y Friberg, 1990).

Dentro de las proteínas empleadas en alimentos sobresalen las proteínas de la leche, debido a que son las proteínas animales mayormente aprovechadas, así mismo, se les puede aislar fácilmente de la leche cruda (Cheftel *et al.*, 1989). Uno de los derivados de las proteínas de la leche más convenientes es el caseinato de sodio. Debido a su buena solubilidad, su actividad de superficie, resistencia al calor, y retención de agua, el caseinato de sodio es empleado extensamente como estabilizante de emulsiones en alimentos como el helado, la crema para café, los licores de crema y la crema batida (Dickinson, 1999).

#### 1.2.1.1 Caseinato de sodio

La caseína o caseínas, son un grupo de proteínas que constituyen aproximadamente el 80% del total de las proteínas de leche, son proteínas fosforadas que entran dentro de la definición de globulinas, son solubles y poseen una gran capacidad de retención de agua.

Los caseinatos son obtenidos por dos procedimientos: tratamiento de cuajo y precipitación ácida. La caseína ácida se produce por un ajuste de pH de 4.5-5, cerca de su punto isoeléctrico, por medio de ácido clorhídrico, sulfúrico o una fermentación láctica (Charalambous y Doxastakis, 1989). El caseinato de sodio es obtenido mediante la precipitación ácida de las proteínas de la leche y posterior neutralización con hidróxido de sodio (Cardona y Casanova, 2004). Está compuesto por distintas fracciones, caseína  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\kappa$  que se diferencian en peso molecular y en la cantidad de grupos fosfato que llevan unidos (Fernández-Sevilla, 2005), en el Cuadro 1.1 se muestran los pesos moleculares y cantidad de grupos fosfato que presentan cada fracción de caseína. La caseína  $\alpha$  es la más hidrófila de todas las caseínas debido a que es la más fosforilada, mientras que la caseína  $\beta$  es la más hidrófoba, ya que las partes fuertemente cargadas están separadas por un trozo muy largo hidrófobo. Por su parte la caseína  $\kappa$  que contiene solo un residuo fosforilado, se fija sólo a algunos iones  $\text{Ca}^{++}$  y su solubilidad no resulta afectada (Cheftel *et al.*, 1998). Las caseínas son proteínas relativamente desestructuradas, y debido a su estructura abierta poseen una alta superficie activa, especialmente la caseína  $\beta$  (Partanen *et al.*, 2009).

Cuadro 1.1 Grupos de la caseína, peso molecular y cantidad de grupos fosfato (Fernández-Sevilla, 2005)

Caseína	PM (g/mol)	Grupos fosfato/molécula
$\alpha_{s1}$	23000	7-9
$\alpha_{s2}$	25000	10-13
$\beta$	24100	4-5
$\kappa$	8000	1.5

Las caseínas  $\alpha$  y  $\beta$  no son solubles en la presencia de calcio (el grupo fosfato es muy insoluble en presencia de calcio). Sin embargo, en conjunto con la caseína  $\kappa$  las caseínas  $\alpha$  y  $\beta$  se solubilizan construyendo un conjunto que forma submicelas, la caseína se dispone de manera que interacciona por su parte hidrófoba hacia el centro quedando la parte hidrófila hacia afuera (Figura 1.7) (Fernández-Sevilla, 2005). Los constituyentes  $\beta$  y  $\kappa$  forman en solución micelas, una de las características de estas micelas es la de formarse sólo a partir de una concentración micelar crítica, que para la caseína  $\beta$  es 0.5 g/L. Las micelas resisten temperaturas superiores a los 100 °C y fuertes tratamientos de homogeneización (Cheftel *et al.*, 1998).

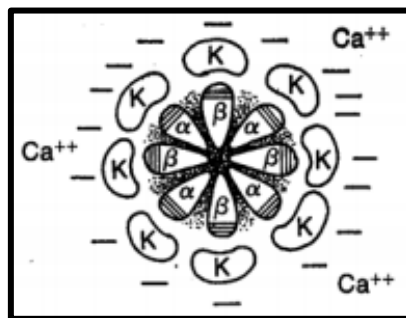


Figura 1.7 Submicela de la caseína (Fernández-Sevilla, 2005).

Por otro lado, la composición en aminoácidos de las caseínas que lo componen, confiere al caseinato de sodio una hidrofobicidad media, ligeramente superior a la de la mayoría de las proteínas globulares, esta propiedad les permite a las caseínas asociarse muy fácilmente en complejos de elevada masa molar. Aún en ausencia de iones minerales, las caseínas tienen un nivel de asociación muy elevado, esta propiedad está ligada a la desigual

repartición de cargas y las cadenas laterales apolares a lo largo de las cadenas peptídicas (Cheftel *et al.*, 1998).

### Propiedades funcionales y aplicación

El caseinato de sodio cuando es fresco es de un sabor agradable, dulce y muestra excelentes propiedades de retención de agua. Es altamente soluble y se puede dispersar rápidamente en fase acuosa (Charalambous y Doxastakis, 1989). Juega un papel central en la estabilización y formación de espumas alimenticias ya que es adsorbido en la interfase aire-agua. En emulsiones, estabiliza las gotas de aceite evitando la coalescencia a través de repulsión electrostática y estérica entre las mismas, debido a su tamaño relativamente pequeño y su estructura abierta posee una rápida adsorción en la interfase aceite-agua (Partanen *et al.*, 2009). Sus fosfoproteínas pueden ser adsorbidas rápidamente en la interfase aceite-agua debido a sus regiones hidrofóbicas e hidrofílicas, por lo que ha sido empleado en mezclas con goma de linaza en la cual se demostró que esta goma mejora la adsorción del caseinato (goma de linaza 0.1-0.3%) (Zhao *et al.*, 2014).

Se ha estudiado el comportamiento del caseinato de sodio en emulsiones al 30% de aceite, en un amplio intervalo de concentraciones (1-10%). Donde se observó que a concentraciones del 1.5-5% se formaron conjuntos de gotas que crecieron hasta colapsar debido a la gravedad. Para concentraciones intermedias (3-5%) aumentó la concentración de caseinato de sodio no adsorbido, lo que incrementó la cantidad de gotas que se unían en conjunto, y para altas concentraciones (mayores al 6%) se formaron grandes agregados que condujeron finalmente al cremado (Liang *et al.*, 2013).

#### 1.2.2 Polisacáridos

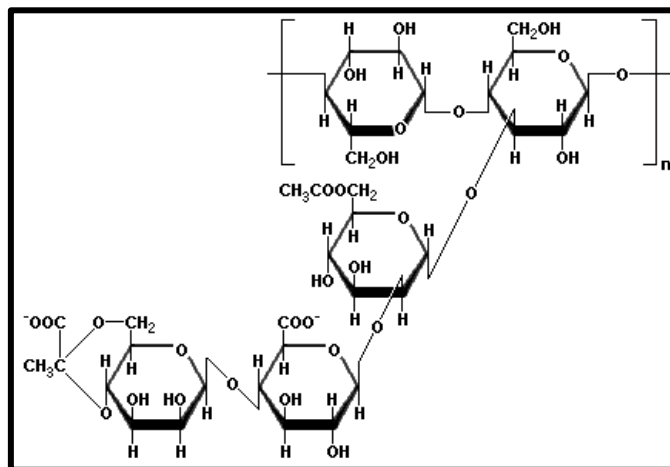
Los polisacáridos constituyen un grupo heterogéneo de polímeros, unidos por diferentes enlaces glucosídicos. Al igual que otras macromoléculas estos polímeros pueden tener una conformación ordenada o carecer de ella. Por su gran capacidad de retener agua producen partículas coloidales muy hidratadas, razón por la cual se les da el nombre de hidrocoloides (Badui, 2006).

El propósito de adicionar a una emulsión un polisacárido es mejorar la textura del producto, así como extender la vida media e inhibir o retardar los procesos de desestabilización como el cremado o la coalescencia. Dentro de los polisacáridos empleados en emulsiones destaca la goma xantana, debido a que es fluidificante a la cizalla con una alta viscosidad en reposo y un bajo esfuerzo de cedencia (Dickinson, 1998). Por otro lado, existen polisacáridos de reciente incorporación en la industria de los alimentos, como los fructanos de agave, que se distinguen por impartir beneficios en la salud, y se ha reportado que tienen propiedades de interfase y buena interacción con el caseinato de sodio (Sosa-Herrera *et al.*, 2016).

### 1.2.2.1 Goma xantana

La goma xantana es un heteropolisacárido con una estructura primaria que consiste de unidades de pentasacáridos formando dos unidades de glucosa, dos unidades de manosa y una unidad de ácido glucurónico, su cadena principal consiste de unidades  $\beta$ -D-glucosa unidas por enlaces en las posiciones 1 y 4 (Figura 1.8). Es producida por la bacteria *Xanthomonas campestris*, que produce la goma como una cobertura de protección. Después de su producción el medio se pasteuriza y se separa por filtración del microorganismo (García-Ochoa *et al.*, 2000).

El peso molecular varía entre los  $2 \times 10^6$  a  $20 \times 10^6$  Da. Esta distribución del peso molecular depende de la asociación entre las cadenas o las condiciones de fermentación durante su producción (García-Ochoa *et al.*, 2000).





*Figura 1.8* Unidad de replicación de la goma xantana (Fennema, 1993).

### Propiedades funcionales y aplicación

La rigidez estructural de la goma xantana produce varias propiedades funcionales como estabilidad al calor, buena tolerancia en soluciones fuertemente ácidas y básicas, viscosidad estable en un intervalo amplio de temperatura, y resistencia a degradación enzimática. Es compatible y estable en presencia de la mayoría de las sales empleadas en alimentos como son las sales de potasio, sodio, calcio y magnesio. Las soluciones acuosas de goma xantana son altamente viscosas en comparación con otras soluciones de polisacáridos preparadas a la misma concentración y se comporta como un material fluidificante característica importante en la estabilización de suspensiones y emulsiones (Fennema, 1993). En el Cuadro 1.2 se muestran algunas aplicaciones de la goma xantana en alimentos.

*Cuadro 1.2* Aplicaciones en alimentos de la goma xantana (García-Ochoa, *et al.*, 2000).

Aplicación	Concentración (% p/p)	Funcionalidad
Aderezos para ensaladas	0.1-0.5	Estabilizante de emulsión, dispersante
Mezclas secas	0.05-0.2	Facilitador de dispersión en agua fría o caliente
Jarabes, cubiertas, salsas	0.05-0.2	Espesante, estabilidad al calor, viscosidad uniforme
Bebidas	0.05-0.2	Estabilizante
Productos lácteos	0.5-0.2	Estabilizante, control de viscosidad
Productos horneados	0.1-0.4	Estabilizante
Productos congelados	0.05-0.20	Mejora la congelación, estabilidad al deshielo

Se ha demostrado que la goma xantana exhibe un comportamiento reológico descrito por el modelo de Carreau (Ec. 1.4) (Kennedy *et al.*, 2014), el cual describe a fluidos que a bajas velocidades de cizalla, su viscosidad, puede considerarse constante e independiente de esta, es decir, muestra un comportamiento newtoniano, para velocidades de cizalla intermedias, presenta un comportamiento no newtoniano, descrito por el modelo de la Ley de la potencia, y para velocidades de cizalla altas el comportamiento vuelve a ser newtoniano:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^p} \quad (1.4)$$

Dónde  $\eta_0$  es la viscosidad a bajas velocidades de cizalla,  $\eta_{\infty}$  la viscosidad a altas velocidades de cizalla,  $p$  el índice de comportamiento al flujo y  $\lambda$  una constante de tiempo (Méndez-Sánchez *et al.*, 2010).

La presencia de goma xantana en las emulsiones aceite en agua mejora la estabilidad del sistema, a concentraciones mayores de 0.08% se alcanza una concentración crítica donde asegura el retardo de la formación de cremado y modifica la reología del sistema. Disminuye el diámetro de las gotas que es consecuencia de aumentar la viscosidad de la fase acuosa. Por encima de dicha concentración, se ha demostrado que la goma xantana induce a las gotas de aceite a flocular por agotamiento (Krstonošić *et al.*, 2014).

La utilización de goma xantana en soluciones acuosas de caseinato de sodio promueven la disminución del tiempo de adsorción del caseinato e incrementan la elasticidad dilatacional de la superficie de las partículas formadas, por lo que se exhibe una diferencia significativa entre la estabilidad de las emulsiones realizadas sólo con caseinato de sodio (Zhao *et al.*, 2012).

#### 1.2.2.2 Fructanos de agave

Los fructanos son carbohidratos de reserva de la planta agave azul (*Tequilana Weber var. Azul*) con fructosa como unidad repetida y una fracción única de glucosa. Presenta una estructura lineal con enlaces  $\beta$  (2-6) fructosil fructosa (Figura 1.9). Poseen una configuración ramificada a diferencia de la configuración lineal presente en la inulina comercial (Arrizon *et al.*, 2010).

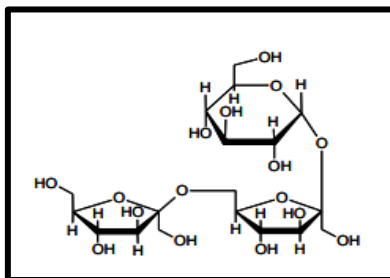


Figura 1.9 Estructura de los fructanos de agave tipo levano, enlaces  $\beta$  (2-6) fructosil fructosa (Arrizon *et al.*, 2010).

### Propiedades funcionales y aplicación

Los fructanos son sustancias a los que se les han asociado una serie de funciones en pro de la salud, dentro de las cuales destacan su efecto benéfico como prebiótico, en la disponibilidad de minerales, el fortalecimiento de los mecanismos de defensa, el mejoramiento del metabolismo de lípidos, así como la prevención de ciertas enfermedades (Ulloa *et al.*, 2010).

La viscosidad de las disoluciones de fructanos de agave exhibe un comportamiento newtoniano a 30 °C para muestras con concentraciones menores o iguales al 80% en peso, sin embargo, la viscosidad aumenta en función de la concentración de fructanos. Para concentraciones más altas, cuando se forma un sistema altamente viscoso, éste exhibe un comportamiento fluidificante a la cizalla a temperatura ambiente (Ponce *et al.*, 2008).

Se han realizado estudios donde se utilizaron fructanos de agave en yogurt reducido en grasa, y se demostró que estos modificaron la microestructura del mismo, así como sus propiedades sensoriales y la reología del sistema, debido a que los fructanos tienden a depositarse en la superficie de las micelas de caseína, al igual que realzan los atributos sensoriales del mismo (Crispín-Isidro *et al.*, 2014).

#### 1.3 Interacción polisacárido-proteína

Mayoritariamente las emulsiones alimenticias están constituidas por combinaciones de polisacáridos y proteínas que son ingredientes esenciales en la formulación de alimentos debido a su habilidad para cambiar la vida media de un producto y modifican la textura de un alimento (Ghosh y Bandyopadhyay, 2012), siendo importante su interacción en la fase continua de dichas emulsiones.

En mezclas acuosas de proteínas y polisacáridos pueden ocurrir tres diferentes resultados:

- (a) Un sistema líquido de dos fases puede obtenerse en el que los dos componentes macromoleculares se mantienen en las diferentes fases. Esto es debido al límite de la compatibilidad termodinámica (también llamado coacervación simple) de proteínas y polisacáridos en medio acuoso.

- (b) Un sistema de dos fases puede ser obtenido donde ambos componentes macromoleculares están concentrados en gran parte en la misma fase. Este fenómeno (coacervación compleja) es atribuido a la formación de un complejo polisacárido-proteína electrostático insoluble.
- (c) Soluciones homogéneas y estables pueden ser obtenidas en el que los dos componentes macromoleculares son o bien co-solubles o existen como complejos solubles

Los tres casos son encontrados cuando una proteína o un polisacárido es adicionado a un sistema alimenticio (Tolstoguzov, 1998), y depende de sus interacciones de atracción-repulsión.

Las interacciones atractivas entre proteína y polisacárido pueden conducir a la formación de complejos solubles o insolubles (Figura 1.10 a y b). La formación de estos últimos puede llevar a un fenómeno de separación de fases llamado coacervación o separación asociativa de fases, que básicamente implica la formación de un complejo macromolecular primario soluble que interactúa para formar agregados eléctricamente neutros, que finalmente sedimentan para formar la fase que contiene ambos biopolímeros. El mecanismo dinámico de la coacervación compleja en sistemas polisacárido-proteína puede ser debido a una nucleación, donde las dos fases coexistentes son una fase rica en solvente con muy pequeñas cantidades de biopolímeros y una fase rica en biopolímeros que contiene los complejos formados (Rodríguez-Patino y Pilosof, 2011).

La separación de fases de las mezclas de polisacárido-proteína ocurre cerca de la concentración crítica. A bajas concentraciones de polisacárido y proteína coexiste una sola fase conteniendo a los biopolímeros en sectores en los que se excluyen mutuamente (Figura 1.10 d), de modo que aumenta la actividad termodinámica de la proteína. Por su parte, los sistemas co-solubles (Figura 1.10 c) permanecen como una sola fase homogénea a escala macroscópica, sin embargo, a nivel molecular cada biopolímero estará excluido uno del otro. Los factores de los que dependen estas interacciones son la carga electrostática del complejo formado por la proteína y el polisacárido en la dispersión, el cual es gobernado por la densidad de carga de cada biopolímero, y por el orden de

adsorción de los biopolímeros en la interfase (simultáneo o secuencial) (Rodríguez-Patino y Pilosof, 2011).

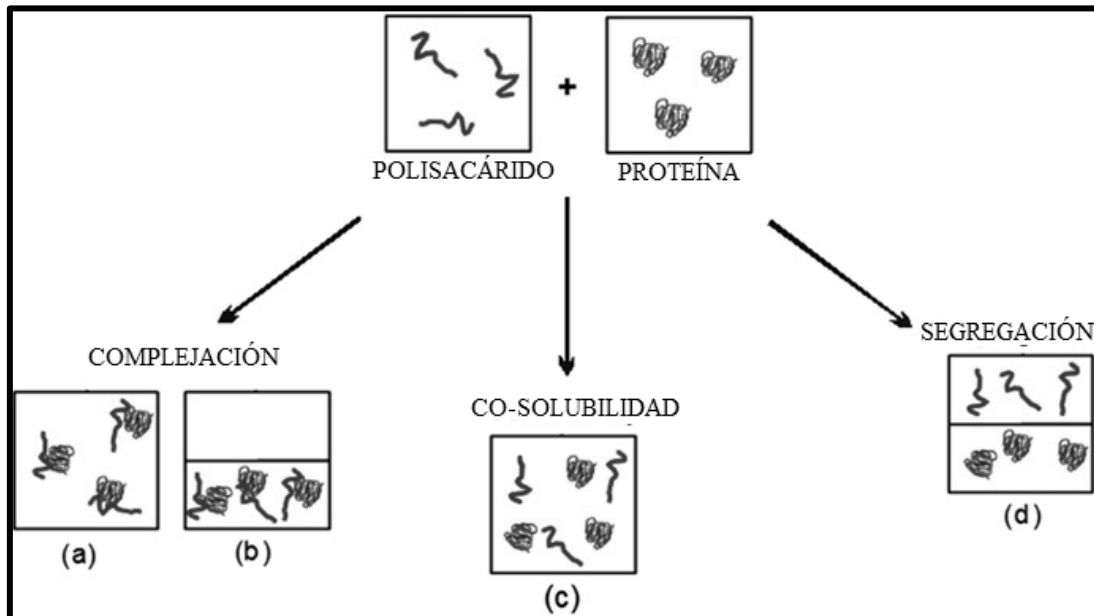


Figura 1.10 Comportamiento de las mezclas polisacárido-proteína (Rodríguez-Patino y Pilosof, 2011).

Por otro lado, cuando una proteína se adsorbe en una interfase fluida bajo condiciones del límite de la compatibilidad termodinámica pueden ocurrir tres fenómenos distintos dentro del sistema (Figura 1.11). (i) hay competencia entre el polisacárido adsorbido en la interfase con la proteína (adsorción competitiva), (ii) el polisacárido forma un complejo con la proteína adsorbida mayoritariamente por interacciones electrostáticas o enlaces de hidrógeno y (iii) debido a la existencia de un límite de compatibilidad termodinámica entre la proteína y el polisacárido concentra a la proteína. Estas interacciones dependen de la estructura química del polisacárido empleado y el pH del sistema (Rodríguez Patino y Pilosof, 2011).



*Figura 1.11* Diferentes mecanismos que se desarrollan en la adsorción y/o interacciones entre biopolímeros (Rodríguez Patino y Pilosof, 2011).

## II. METODOLOGÍA

### OBJETIVOS

#### GENERAL

Evaluar el efecto de la concentración de fructanos de agave en emulsiones aceite en agua con caseinato de sodio y goma xantana mediante el estudio del comportamiento al flujo, transmisión-retrodispersión de luz y tamaño de partículas, relacionándolo con la estabilidad del sistema.

#### PARTICULARES

1. Determinar el efecto de la concentración de fructanos de agave sobre el comportamiento al flujo de las emulsiones y sus correspondientes sistemas acuosos, elaborados con caseinato de sodio y goma xantana mediante pruebas de cizalla simple.
2. Determinar el efecto de la concentración de fructanos de agave en la estabilidad de emulsiones elaboradas con caseinato de sodio y goma xantana mediante pruebas de transmisión-retrodispersión de luz y distribución de tamaño de partícula, estableciendo la concentración que proporcione mayor estabilidad.
3. Determinar el efecto de la concentración de goma xantana en el comportamiento al flujo y estabilidad de las emulsiones elaboradas con caseinato de sodio y fructanos de agave mediante pruebas de cizalla simple, transmisión-retrodispersión de luz y tamaño de partícula, estableciendo aquella concentración que interfiera en menor medida sobre la funcionalidad de los fructanos de agave, manteniendo el sistema estable.

#### 2.1 Materiales y métodos

##### 2.1.1 Materiales

Los hidrocoloides empleados fueron caseinato de sodio (Nutrer, México) con  $6.78\% \pm 0.057\%$  de humedad, en concentración de 1%, fructanos de agave (Ingredion, México) con  $3.70\% \pm 0.15\%$  de humedad, en concentraciones de 1, 3, 5 y 10% y goma xantana (Kelco,

Estados Unidos) con 10.12% de humedad en concentración de 0.03, 0.05, 0.1 y 0.25%. Las concentraciones se expresan como porcentaje en peso en base seca.

Los sistemas acuosos se prepararon en agua purificada (E- Pura, Pepsico, México).

Para las emulsiones se utilizó aceite puro de canola comercial (Capullo, Alimentos Capullo, México) en concentración de 30% en peso.

## 2.1.2 Métodos

### 2.1.2.1 Preparación de las muestras

#### Sistemas acuosos

Para los sistemas acuosos, se realizaron las disoluciones de cada biopolímero por separado al doble de la concentración requerida ya que al elaborar las mezclas de ambos sistemas éstas se hicieron combinando partes iguales de cada componente.

Primero se preparó el sistema de fructanos de agave-caseinato de sodio, donde se adicionó el caseinato de sodio en agua con agitación (Cimarec, Thermolyne, Estados Unidos) a 25 °C durante 15 minutos, posteriormente se agregaron los fructanos de agave y se continuó con la agitación por 20 minutos.

Por otro lado, se prepararon los sistemas acuosos de goma xantana, ésta se adicionó en agua y homogenizó en un agitador de propela (RW20, IKA, Estados Unidos) con paletas de hélice, a una velocidad de 300 rpm, durante 10 minutos.

Para la mezcla de los tres hidrocoloides se incorporaron los sistemas acuosos empleando agitación (Cimarec, Thermolyne, Estados Unidos) durante 10 minutos a una temperatura de 25 °C.

#### Emulsiones

Se adicionó el aceite al sistema acuoso poco a poco y se formó una pre emulsión a una velocidad aproximada de 4909 rpm durante 1 min a 25 °C. Posteriormente se homogenizó la muestra en un agitador de alta velocidad (L4R, Silverson, Inglaterra) a una velocidad aproximada de 10199 rpm durante 1 min a 25 °C.



### 2.1.2.2 Caracterización física

#### Humedad de biopolímeros en polvo

Para la determinación de humedad de los materiales a emplear se utilizó una termobalanza (Ohaus, MB45, Suiza) a la cual se introdujo 0.5 g de muestra aproximadamente, a una temperatura de 110 °C hasta que el instrumento marcó que la prueba había sido terminada, el criterio de finalización está basado en la pérdida de peso por unidad de tiempo, tan pronto como la pérdida de peso media sea menor que un valor predefinido el equipo considera que la desecación ha concluido. La termobalanza funciona sobre la base del principio termogravimétrico, al comienzo de la medida, la termobalanza determina el peso de la muestra, a continuación, la muestra se calienta rápidamente por medio de la unidad halógena desecadora y la humedad se evapora. Durante la operación de desecación, el equipo determina continuamente el peso de la muestra y presenta el resultado (Ohaus Corporation, 2001). Se realizaron 3 repeticiones para cada muestra y se calculó la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

#### Distribución de tamaño de partícula

La medición de tamaño de partícula de las emulsiones elaboradas se realizó en un granulómetro (CILAS 930, Francia) a 25 °C, en el cual se introdujeron unos pocos mililitros de la muestra hasta lograr una obscuración entre 8-15%. El principio del granulómetro se basa en la difracción de una fuente de luz por las muestras en análisis obteniéndose un patrón de difracción en forma de anillos concéntricos. La distancia entre cada anillo depende del tamaño de partícula, obteniéndose un gráfico con la distribución del tamaño de partícula (Figura 2.1) (CILAS, 2004).

Para cada muestra se realizaron tres o cuatro repeticiones, con y sin la aplicación de ultrasonido, de las cuales se hicieron sus gráficos correspondientes, de dichos gráficos se contaron la cantidad de picos que presenta, que indican las modas de los diámetros de partícula que presenta (Figura 2.1), para la distribución acumulativa se promediaron los diámetros que se obtuvieron al 10, 50 y 90% de la población, de los datos obtenidos se calculó la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

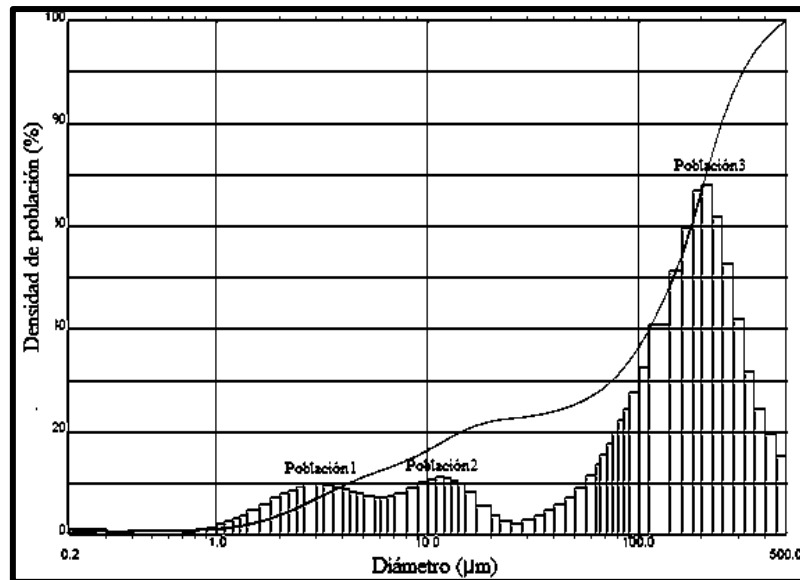


Figura 2.1 Gráfico de la distribución de tamaño de partícula, y de la distribución acumulativa (línea continua), obtenido en el granulómetro (CILAS, 2004).

### Estabilidad de emulsiones por transmisión-retrodispersión de luz

Las muestras se analizaron colocando un tubo de vidrio (borosilicato) a 25 °C, a una altura de 60 mm y se introdujeron en el analizador de luz Turbiscan MA2000 (Formulation, Francia). El principio del analizador de luz es la radiación electromagnética que incide sobre una dispersión, una parte de los fotones sufre pocos eventos de dispersión antes de abandonar el medio (transmisión), y la otra parte corresponde a los fotones que sufren gran cantidad de eventos de dispersión antes de escapar del medio (retrodispersión) (Figura 2.2). El modo de operación del analizador de luz Turbiscan es el de transmisión-retrodispersión de luz, en el cual un cabezal de lectura se mueve a lo largo del tubo de vidrio, toma la lectura de la luz transmitida o retrodispersada cada 40 mm en una altura de muestra máxima de 80 mm, con los datos obtenidos del equipo de intensidad de luz se obtuvieron perfiles que permiten caracterizar la dispersión (Figura 2.3) (Mengual *et al.*, 1999).

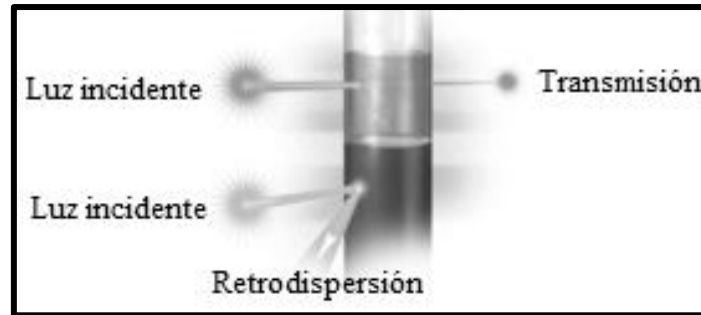


Figura 2.2 Principio de funcionamiento del analizador de luz turbiscan (Mengual *et al.*, 1999).

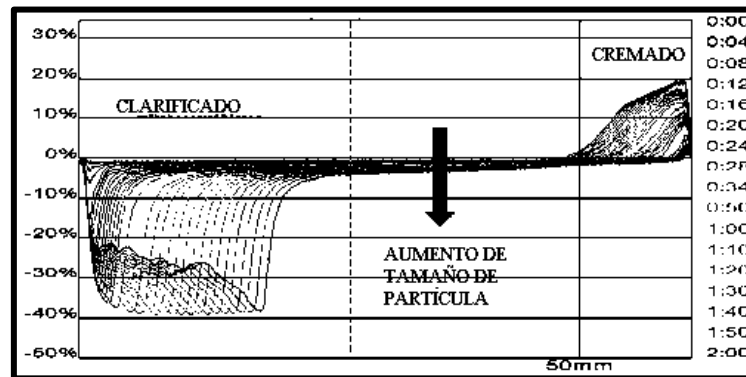


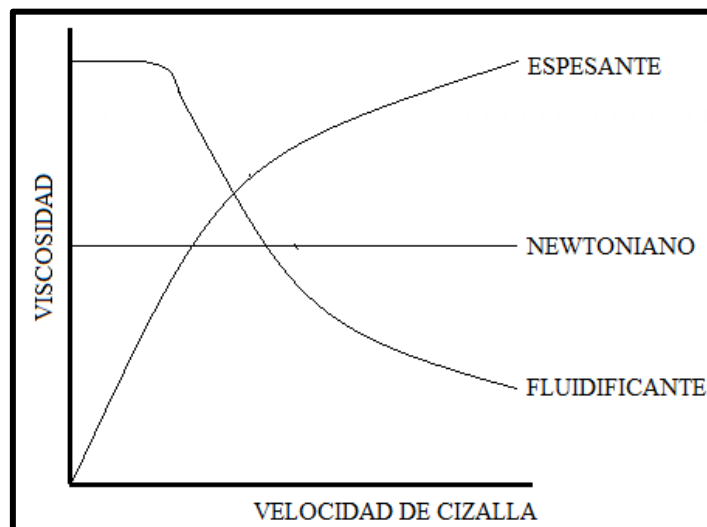
Figura 2.3 Perfil de la retrodispersión de luz (Mengual *et al.*, 1999).

Para cada muestra se realizaron tres repeticiones y se analizó la evolución del pico de clarificado, para las muestras que sufrieron pocos cambios el monitoreo se realizó cada hora durante 3 días, y para las muestras en las que los cambios sucedían más rápidamente el monitoreo fue cada 5 minutos durante 3 horas. Para las muestras estables se determinó el tiempo que éstas permanecieron sin presentar cambios, es decir el tiempo que tardaron las emulsiones sin clarificar y se realizó un promedio de los tiempos obtenidos; para las muestras que fueron inestables se realizaron gráficos de la distancia que alcanzó el clarificado en función del tiempo, obteniéndose la velocidad de clarificado a partir de la pendiente resultante.

### 2.1.2.3 Pruebas reológicas

Se realizaron pruebas de cizalla simple a 25 °C en un reómetro de control de esfuerzos (Physica MCR301, Anton Paar, Austria) con una geometría de cono de 1° de ángulo y 75 milímetros de diámetro, donde se realizaron dos ciclos de ascenso-descenso en un

intervalo de velocidad de cizalla de  $0.1-500 \text{ s}^{-1}$ , de los que se obtuvieron 25 datos de esfuerzo de cizalla, con los datos se realizaron curvas del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla, que se ajustaron a un modelo reológico y se obtuvieron los parámetros correspondientes al mismo (Figura 2.4), de los cuales se calculó la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación. El principio de medición del reómetro es transferir cantidad de movimiento desde el cono o placa que rota hacia la placa en la que está contenida la muestra. Se mide el par de torsión o torque del motor, requerido para mover el cono o placa y se transforma a esfuerzo de cizalla por una constante. La velocidad de rotación se transforma en velocidad de cizalla con la constante de proporcionalidad respectiva, que también depende de las dimensiones del cono o placa que rota utilizados. La viscosidad, que es una medida de la resistencia a transferir cantidad de movimiento, se calcula a través del cociente del esfuerzo de cizalla entre la velocidad de cizalla. Las curvas de flujo o viscosidad, se elaboran trazando un gráfico del esfuerzo de cizalla o de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla. El instrumento permite controlar también, el esfuerzo de cizalla y medir la velocidad de cizalla respectiva, que se recomienda utilizar en el caso de que el material fluido requiera un esfuerzo de cedencia para comenzar a fluir (Martínez-Padilla, 2012).



*Figura 2.4* Curva de flujo para identificar la dependencia de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla (Steffe, 1992).

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Distribución de tamaño de partícula de emulsiones

##### 3.1.1 Fructanos de agave

En la Figura 3.1a se muestra la distribución del tamaño de los glóbulos de aceite obtenidos de las emulsiones elaboradas con fructanos de agave a concentraciones de 1, 3, 5, 10, 15 y 20% y la emulsión elaborada con 1% de caseinato de sodio, sin la aplicación de ultrasonido. En ésta se puede apreciar que la distribución de tamaño de glóbulo depende de la concentración de fructanos de agave. Se destaca que a concentraciones del 5% de fructanos de agave los tamaños de los glóbulos de aceite se agrupan en dos poblaciones que presentan diámetros de glóbulo pequeños, encontrándose el 90% de los diámetros por debajo de los 42.8  $\mu\text{m}$ . A concentraciones por debajo del 5% de fructanos de agave se observa la presencia de tres picos que indican que los tamaños de los glóbulos de aceite se distribuyen mayoritariamente en tres diferentes diámetros (Cuadro 3.1), encontrándose el 50% de los valores por debajo de los 9.4  $\mu\text{m}$ ; por otro lado, se observa que a concentraciones por arriba del 5% la distribución de los diámetros de los glóbulos tiende a aumentar hacia diámetros más grandes estando el 50% de los valores por debajo de 150.7  $\mu\text{m}$  (Cuadro 3.2). De igual forma, en la Figura 3.1b se puede ver que existe un efecto en el tamaño de partícula cuando se aplica ultrasonido durante la medición de las muestras, en las que se observa una tendencia a diámetros de partícula más pequeños, lo que indica la presencia de agregados que se disgregan al aplicarlo, obteniendo así distribuciones de tamaño de partícula más homogéneas (Cuadro 3.1) en las que no se distingue tan marcadamente el efecto de las diferentes concentraciones de fructanos de agave empleadas y que el 50% de la población se encuentra por debajo de los 6.08  $\mu\text{m}$  (Cuadro 3.2). Sin embargo, para la concentración del 5% el ultrasonido no afectó de manera importante y la distribución de los diámetros se mantuvo cercana a la presentada cuando no se aplicó ultrasonido. Al comparar los diámetros obtenidos de las emulsiones elaboradas con fructanos de agave con las elaboradas con caseinato de sodio, se aprecia que los diámetros que presentan las emulsiones con caseinato de sodio son mayores que los de las emulsiones elaboradas a bajas concentraciones de fructanos de agave (1, 3 y 5%).

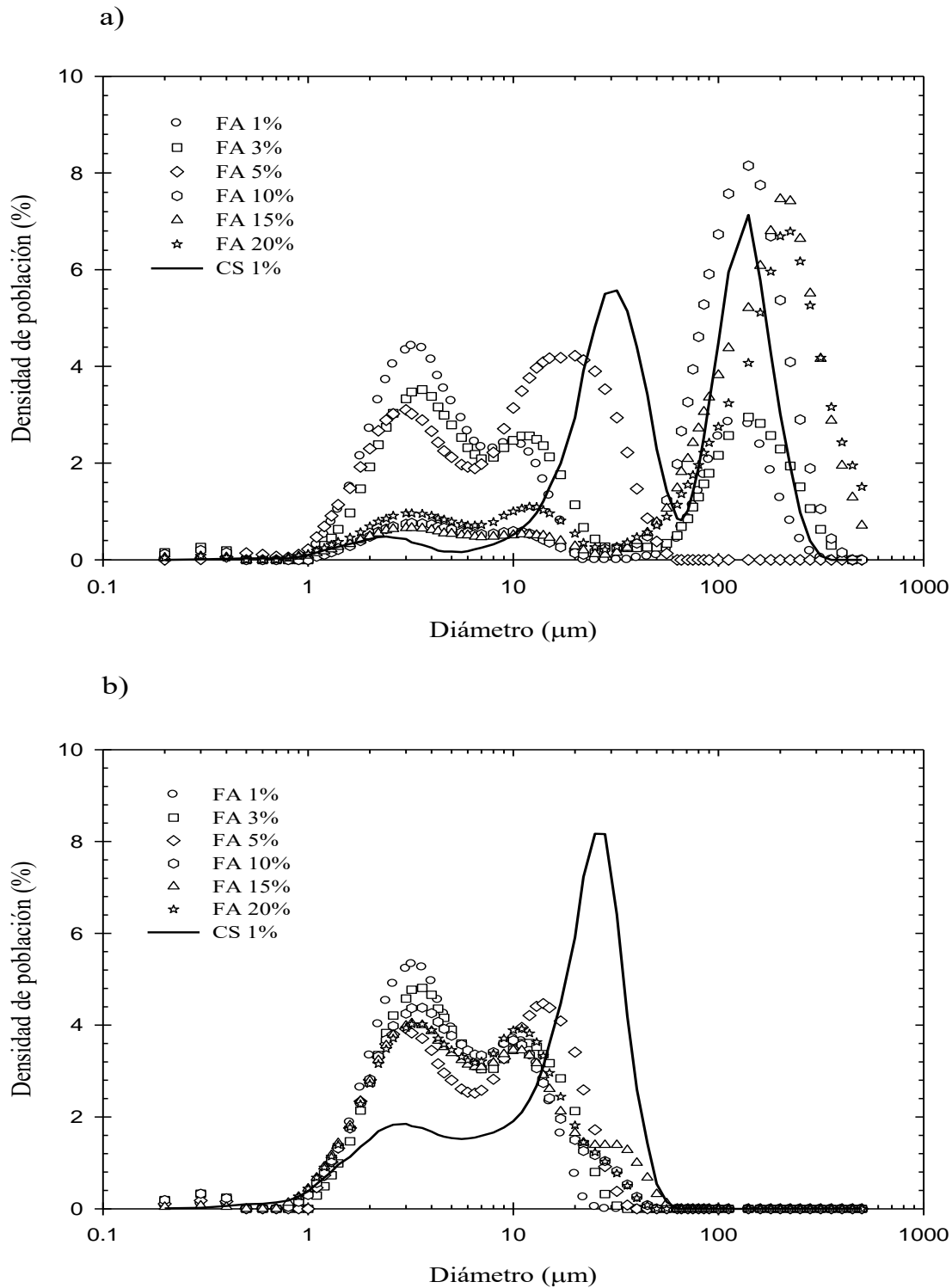


Figura 3.1 Distribución de tamaño de partícula de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA), sin ultrasonido a), con ultrasonido b).

*Cuadro 3.1* Modas de los diámetros de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave.

Muestra	Diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ )				
	Sin ultrasonido			Con ultrasonido	
	Población 1	Población 2	Población 3	Población 1	Población 2
<b>Fructanos de agave 1%</b>	<b>3.2</b>	<b>11</b>	<b>84</b>	<b>3.2</b>	<b>10.6</b>
Desviación estándar	0	1	19.8	0	1.15
Coefficiente de variación (%)	0	9	15	0	11
<b>Fructanos de agave 3%</b>	<b>3.6</b>	<b>11</b>	<b>153.3</b>	<b>3.6</b>	<b>11</b>
Desviación estándar	0	0	11.5	0	0
Coefficiente de variación (%)	0	0	8	0	0
<b>Fructanos de agave 5%</b>	<b>3</b>	<b>14.7</b>	-	<b>3</b>	<b>14</b>
Desviación estándar	0	4.73	-	0	3
Coefficiente de variación (%)	0	32	-	0	21
<b>Fructanos de agave 10%</b>	<b>3.1</b>	<b>140</b>	-	<b>3.5</b>	<b>10</b>
Desviación estándar	0.12	0	-	0.23	0
Coefficiente de variación (%)	4	0	-	7	0
<b>Fructanos de agave 15%</b>	<b>3</b>	<b>203</b>	-	<b>3.2</b>	<b>10.7</b>
Desviación estándar	0	47	-	0	0.5
Coefficiente de variación (%)	0	23	-	0	5
<b>Fructanos de agave 20%</b>	<b>3.1</b>	<b>11</b>	<b>224</b>	<b>3.2</b>	<b>10.7</b>
Desviación estándar	0.1	1	0	0	0.6
Coefficiente de variación (%)	4	9	0	0	6
<b>Caseinato de sodio 1%</b>	<b>2.5</b>	<b>29</b>	<b>140</b>	<b>3</b>	<b>26</b>
Desviación estándar	0.1	2.3	0	0	1.7
Coefficiente de variación (%)	5	8	0	0	7

*Cuadro 3.2* Valores al 10, 50 y 90% de fracción acumulada del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave.

Muestra	Diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ )					
	Sin ultrasonido			Con ultrasonido		
	10 %	50%	90%	10%	50%	90%
Fructanos de agave 1%	1.9	5.9	9.3	1.8	4.1	12.3
Fructanos de agave 3%	2.1	9.4	172.1	1.7	4.5	14.2
Fructanos de agave 5%	1.8	7.6	42.8	1.7	6.0	17.7
Fructanos de agave 10%	5.3	109.1	196.1	1.6	4.6	15.3
Fructanos de agave 15%	17.9	140.8	284.4	1.7	5.0	16.4
Fructanos de agave 20%	5.3	150.7	310.5	1.8	5.4	17.0
Caseinato de sodio 1%	13.7	41.1	167.8	2.0	15.1	10.4

### 3.1.2 Fructanos de agave-caseinato de sodio

En la Figura 3.2 se muestra la distribución del tamaño de los glóbulos de aceite obtenidos de las emulsiones elaboradas con fructanos de agave al 1, 3, 5 y 10%, en mezcla con caseinato de sodio al 1%. Se puede apreciar que existen tres diferentes poblaciones (Figura 3.2a) indicando que los tamaños de los glóbulos de aceite se distribuyen mayoritariamente en tres diferentes diámetros. Se puede ver que existe un efecto en el tamaño de partícula cuando se aplica ultrasonido pasando de presentar tres poblaciones a presentar solo dos, indicando que existen agregados que se disgregan al aplicarlo (Figura 3.2b). Al comparar los diámetros obtenidos con los que mostró la emulsión elaborada sólo con caseinato de sodio, se observa que la distribución es similar (Cuadro 3.3 y 3.4), independientemente de la concentración de fructanos de agave, lo cual indica que es el caseinato de sodio el que confiere las características a la emulsión, esto podría explicarse debido a que las fosfoproteínas del caseinato de sodio se adsorben rápidamente en la interfase aceite-agua (Zhao *et al.*, 2014). Por otro lado, al comparar los diámetros de partícula presentados por las emulsiones elaboradas con fructanos de agave en mezcla con goma xantana, con los que mostraron las emulsiones elaboradas sólo con fructanos de agave, se puede distinguir que éstos últimos fueron menores cuando se emplearon concentraciones del 1, 3 y 5%.

Cuadro 3.3 Modas de los diámetros de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con caseinato de sodio (C S).

Emulsión	Diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ )				
	Sin ultrasonido			Con ultrasonido	
	Población 1	Población 2	Población 3	Población 1	Población 2
<b>FA1%CS1%</b>	<b>2.4</b>	<b>32</b>	<b>153.3</b>	<b>3</b>	<b>28</b>
Desviación estándar	0.1	4	11.5	0	0
Coefficiente de variación (%)	6	12	8	0	0
<b>FA3%CS1%</b>	<b>2.5</b>	<b>27</b>	<b>130.7</b>	<b>3</b>	<b>22</b>
Desviación estándar	0.1	1.7	16.2	0	0
Coefficiente de variación (%)	4	6	12	0	0
<b>FA5%CS1%</b>	<b>2.5</b>	<b>24</b>	<b>112</b>	<b>2.9</b>	<b>22</b>
Desviación estándar	0.1	1.7	0	0.2	0
Coefficiente de variación (%)	4	7	0	8	0
<b>FA10%CS1%</b>	<b>2.5</b>	<b>25</b>	<b>130.7</b>	<b>2.9</b>	<b>22</b>
Desviación estándar	0.1	0	16.2	0.2	0
Coefficiente de variación (%)	5	0	12	8	0
<b>CS 1%</b>	<b>2.5</b>	<b>29</b>	<b>140</b>	<b>3</b>	<b>26</b>
Desviación estándar	0.1	2.3	0	0	1.7
Coefficiente de variación (%)	5	8	0	0	7



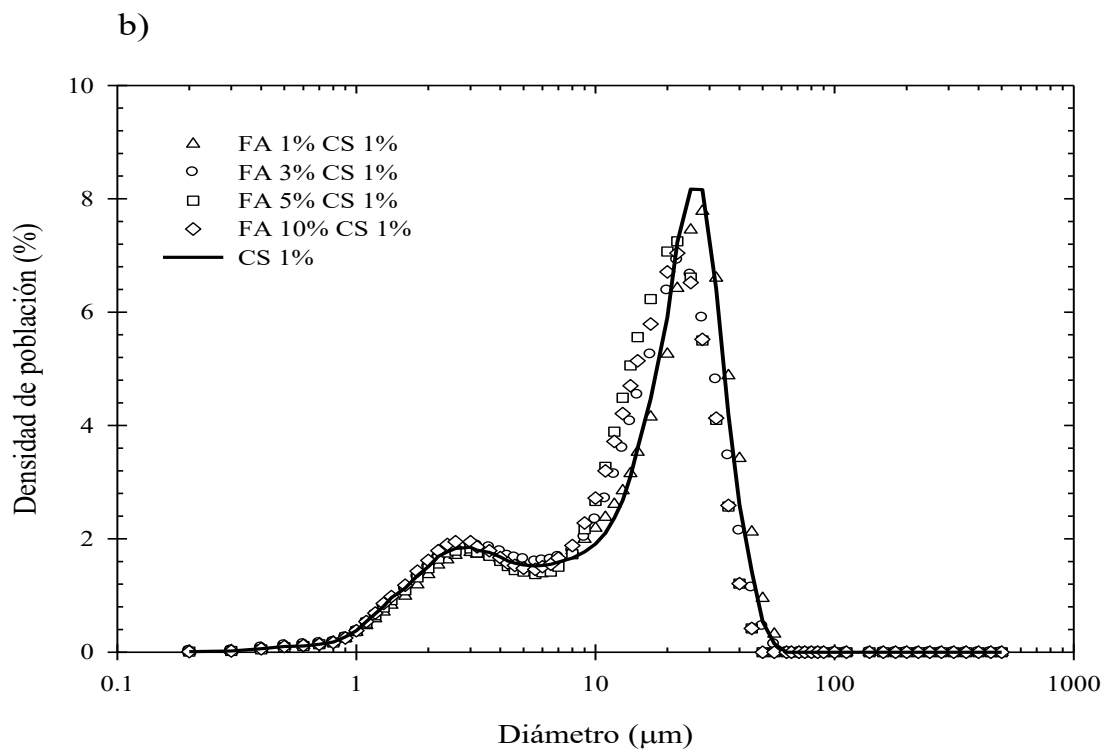
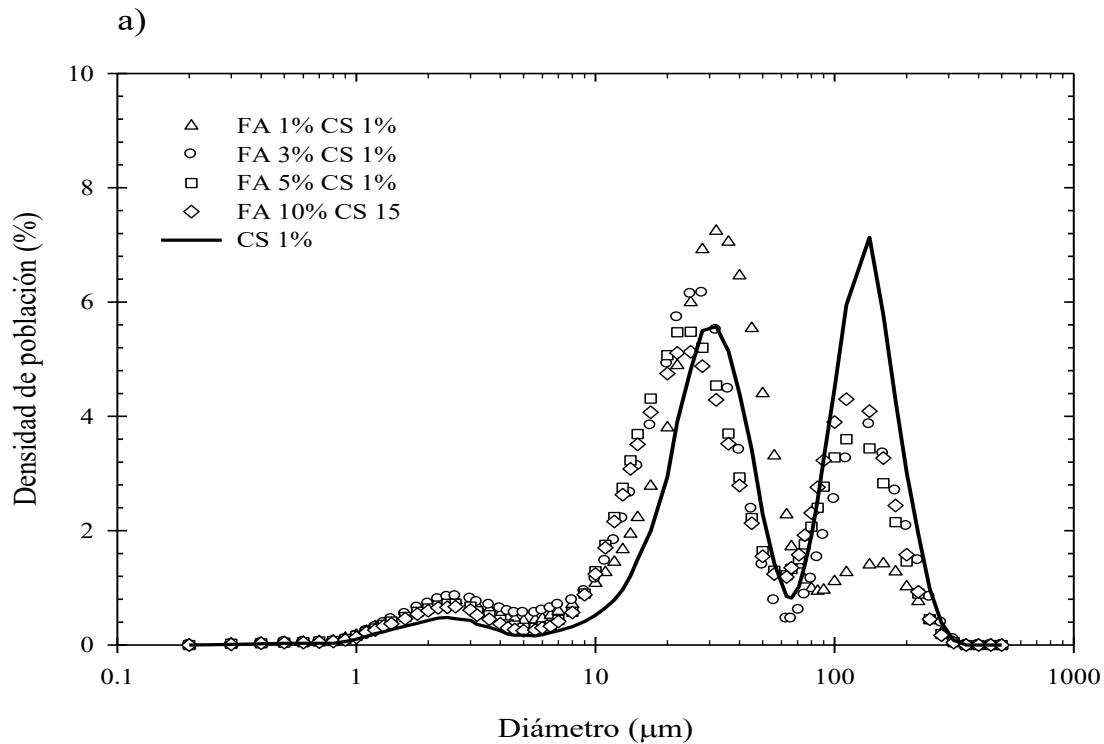


Figura 3.2 Distribución de tamaño de partícula de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con caseinato de sodio (CS), sin ultrasonido a), con ultrasonido b).

*Cuadro 3.4* Valores al 10, 50 y 90% de fracción acumulada del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con caseinato de sodio (CS).

Emulsión	Diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ )					
	Sin ultrasonido			Con ultrasonido		
	10%	50%	90%	10%	50%	90%
FA1%CS1%	6.1	29.6	116.4	2.4	18.4	35.6
FA3%CS1%	5.1	26.2	133.3	2.2	15.4	30.6
FA5%CS1%	6.5	24.5	98.6	2.2	14.5	27.9
FA10%CS1%	7.9	30.4	140.6	2.1	14.7	27.6
CS 1%	13.7	41.1	167.8	2.0	15.1	10.4

### 3.1.3 Fructanos de agave-caseinato de sodio-goma xantana

#### a) Efecto de la concentración de goma xantana

En la Figura 3.3 se presenta la distribución de tamaño de partícula de los glóbulos de aceite obtenidos de las emulsiones elaboradas con goma xantana al 0.03, 0.05, 0.1 y 0.25% en combinación con fructanos de agave al 5% y caseinato de sodio al 1%. Se distingue que la concentración de goma xantana afecta la distribución de los tamaños de partícula, en dónde se observa que éstos tienden a disminuir conforme aumenta la concentración de goma xantana (Cuadro 3.5).

Las emulsiones elaboradas con 0.03 y 0.1% de goma xantana presentaron una tercera población, ambas con diámetros de 121.3  $\mu\text{m}$ . Cabe destacar que a las concentraciones de 0.03 y 0.05% se sigue observando el dominio del caseinato de sodio sobre la distribución del tamaño de partícula. Mientras que a las concentraciones del 0.1 y 0.25% se obtuvieron los menores tamaños de partícula, de tal forma que en los datos acumulativos el 50% de la población se encuentra por debajo de los 16.6  $\mu\text{m}$  (Cuadro 3.6). Al aplicar ultrasonido durante la medición no se afectó de manera importante a los tamaños de partícula presentados, manteniéndose en diámetros similares a los presentados cuando éste no se aplicó; en las emulsiones que presentaban una tercera población mostraron solo dos poblaciones, pero se mantuvieron los mismos diámetros para las primeras dos poblaciones.

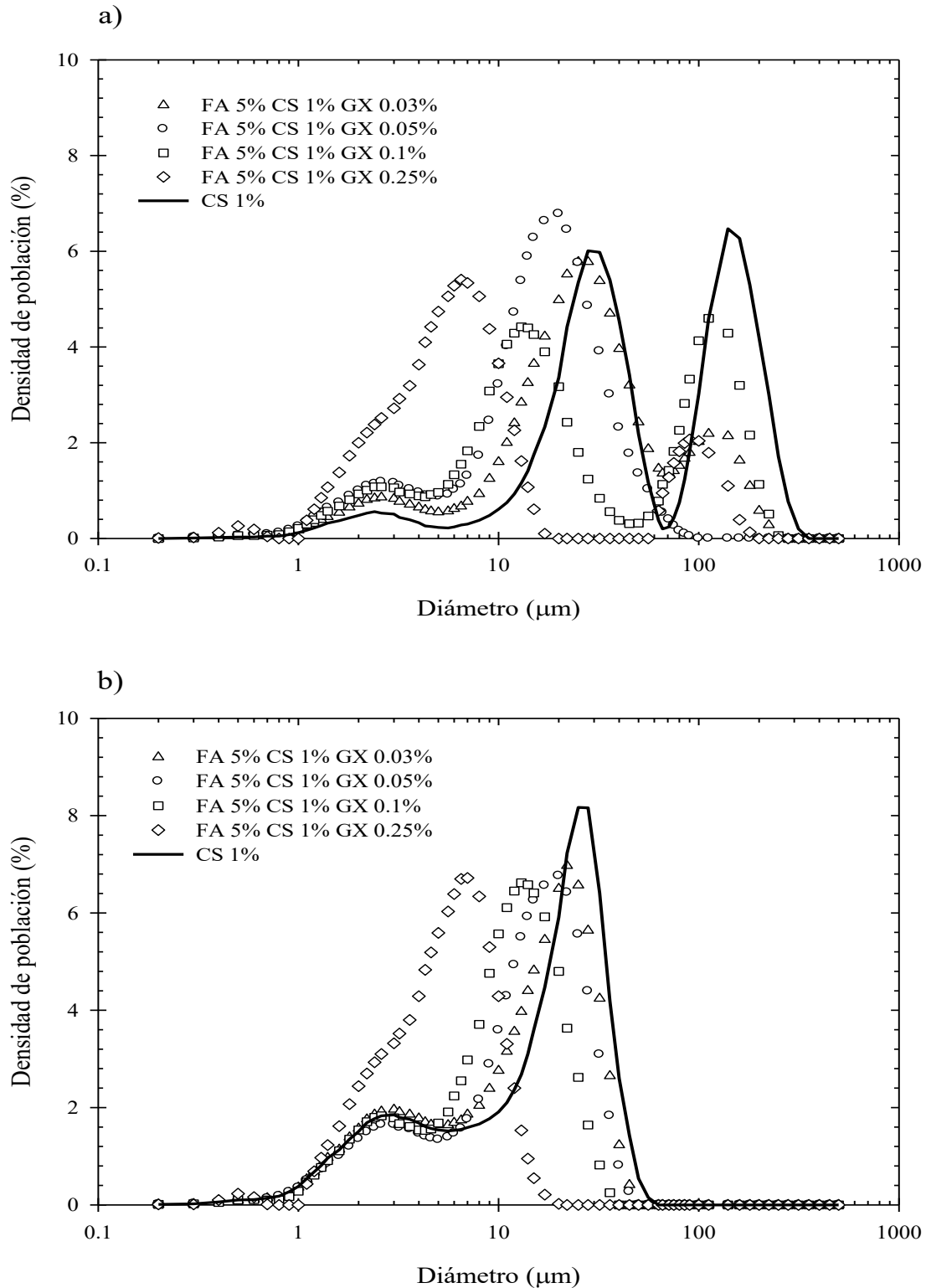


Figura 3.3 Distribución de tamaño de partícula de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de goma xantana (GX) en mezcla con caseinato de sodio (CS) y fructanos de agave (FA), a) sin ultrasonido, b) con ultrasonido.

*Cuadro 3.5* Modas de los diámetros de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de goma xantana (GX) en mezcla con fructanos de agave (FA) y caseinato de sodio (CS).

Emulsión	Diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ )				
	Sin ultrasonido			Con ultrasonido	
	Población 1	Población 2	Población 3	Población 1	Población 2
<b>FA5%CS1%GX0.03%</b>	<b>2.5</b>	<b>25</b>	<b>121.3</b>	<b>3</b>	<b>22</b>
Desviación estándar	0.1	0	16.2	0	0
Coefficiente de variación (%)	5	0	13	0	0
<b>FA5%CS1%GX0.05%</b>	<b>2.7</b>	<b>20</b>	-	<b>2.7</b>	<b>19</b>
Desviación estándar	0.23	0	-	0.2	1.7
Coefficiente de variación (%)	8	0	-	8	9
<b>FA5%CS1%GX0.1%</b>	<b>2.7</b>	<b>13</b>	<b>121.3</b>	<b>2.6</b>	<b>13</b>
Desviación estándar	0.31	0	16.17	0	0
Coefficiente de variación (%)	11	0	13	0	0
<b>FA5%CS1%GX0.25</b>	<b>0.5</b>	<b>6.5</b>	-	<b>0.5</b>	<b>6.8</b>
Desviación estándar	0	0	-	0	0.29
Coefficiente de variación (%)	0	0	-	0	4
<b>CS 1%</b>	<b>2.5</b>	<b>29</b>	<b>140</b>	<b>3</b>	<b>26</b>
Desviación estándar	0.1	2.3	0	0	1.7
Coefficiente de variación (%)	5	8	0	0	7

*Cuadro 3.6* Valores al 10, 50 y 90% de fracción acumulada del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de goma xantana (GX) en mezcla con fructanos de agave (FA) y caseinato de sodio (CS).

Emulsión	Diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ )					
	Sin ultrasonido			Con ultrasonido		
	10%	50%	90%	10%	50%	90%
FA5%CS1%GX0.03%	5.0	24.6	102.5	2.1	13.7	27.6
FA5%CS1%GX0.05%	3.6	18.6	75.8	2.2	12.9	25.5
FA5%CS1%GX0.1%	3.1	16.6	135.7	2.1	10.0	19.9
FA5%CS1%GX0.25%	1.9	5.3	9.97	1.8	5.0	9.4
CS 1%	13.7	41.1	167.8	2.0	15.1	10.4

b) Efecto de la concentración de fructanos de agave

En la Figura 3.4 se muestra la distribución del tamaño de partícula de las emulsiones elaboradas con fructanos de agave al 1, 3, 5 y 10% en mezcla con caseinato de sodio al 1% y goma xantana al 0.03%. Se distingue que la distribución de tamaño de partícula es similar entre sí, y se observa claramente el dominio del caseinato de sodio

independientemente de la concentración de fructanos de agave. En el Cuadro 3.7 se puede ver que la distribución exhibe tres poblaciones, donde la primera se encuentra entre los 2.5-2.6  $\mu\text{m}$  y la emulsión elaborada sólo con caseinato de sodio presenta un diámetro de 2.5  $\mu\text{m}$ , la segunda población se encuentra entre los 20-25  $\mu\text{m}$  y mientras que con sólo caseinato de sodio muestra una población de 29  $\mu\text{m}$ , y para la tercera población los diámetros son de 147.6  $\mu\text{m}$  y el caseinato solo es de 140  $\mu\text{m}$ , dicha similitud permanece aun cuando se aplica ultrasonido. Sin embargo, al comparar la fracción acumulada (Cuadro 3.8), se puede destacar que al 50% las emulsiones que contienen fructanos de agave en su formulación los diámetros se encuentran por debajo de los 25  $\mu\text{m}$ , con excepción de la elaborada a la concentración del 3% de fructanos de agave. Mientras que la emulsión sólo con caseinato de sodio el 50% de su población se encuentra debajo de los 42  $\mu\text{m}$ . En la Figura 3.4b se puede ver un efecto cuando se aplica ultrasonido durante la medición de las muestras, ya que las emulsiones pasaron de tener una tercera población a mostrar sólo dos poblaciones, indicando que existen agregados que se disgregan, sin embargo, se aprecia que los diámetros de la primera y segunda población son similares entre sí, con y sin la aplicación de ultrasonido.

*Cuadro 3.7* Modas de los diámetros de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con caseinato de sodio (CS) y goma xantana (GX).

Emulsión	Diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ )				
	Sin ultrasonido			Con ultrasonido	
	Población 1	Población 2	Población 3	Población 1	Población 2
<b>FA1%CS1%GX0.03%</b>	<b>2.6</b>	<b>25</b>	<b>126.7</b>	<b>3.05</b>	<b>22</b>
Desviación estándar	0.1	1.5	23.1	0.1	0
Coefficiente de variación (%)	4	6	18	3	0
<b>FA3%CS1%GX0.03%</b>	<b>3</b>	<b>20</b>	<b>137.3</b>	<b>3</b>	<b>20</b>
Desviación estándar	0	0	19.7	0	0
Coefficiente de variación (%)	0	0	14	0	0
<b>FA5%CS1%GX0.03%</b>	<b>2.5</b>	<b>25</b>	<b>121.3</b>	<b>3</b>	<b>22</b>
Desviación estándar	0.1	0	16.2	0	0
Coefficiente de variación (%)	5	0	13	0	0
<b>FA10%CS1%GX0.03%</b>	<b>2.6</b>	<b>22</b>	<b>147.6</b>	<b>2.6</b>	<b>21.3</b>
Desviación estándar	0	0	12	0	1.2
Coefficiente de variación (%)	0	0	8	0	5
<b>CS 1%</b>	<b>2.5</b>	<b>29</b>	<b>140</b>	<b>3</b>	<b>26</b>
Desviación estándar	0.1	2.3	0	0	1.7
Coefficiente de variación (%)	5	8	0	0	7

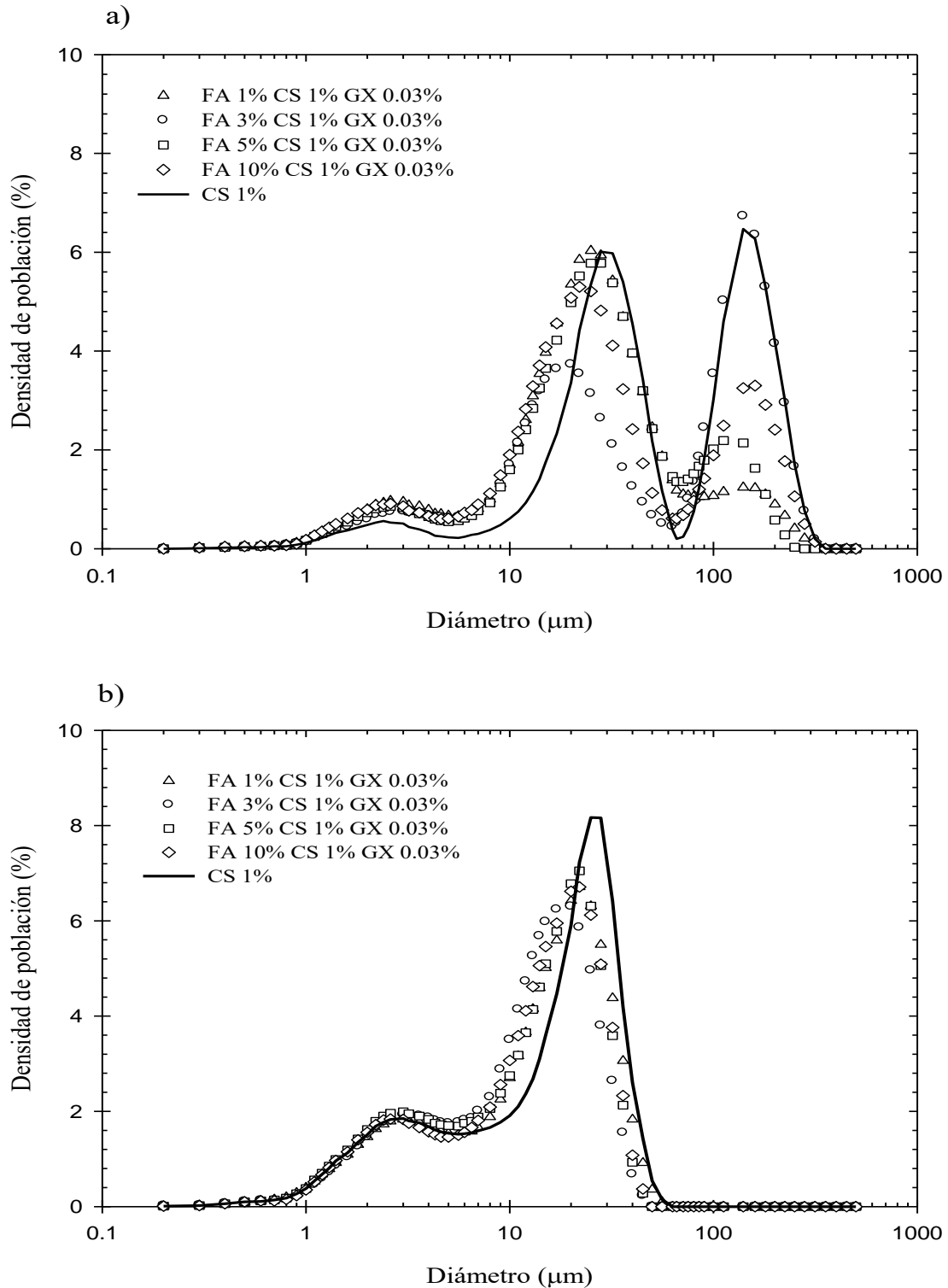


Figura 3.4 Distribución de tamaño de partícula de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con caseinato de sodio (CS) y goma xantana (GX), a) sin ultrasonido, b) con ultrasonido.

*Cuadro 3.8* Valores al 10, 50 y 90% de fracción acumulada del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con caseinato de sodio (CS) y goma xantana (GX).

Emulsión	Diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ )					
	Sin ultrasonido			Con ultrasonido		
	10%	50%	90%	10%	50%	90%
FA1%CS1%GX0.03%	4.5	23.7	86.9	2.2	14.2	29.8
FA3%CS1%GX0.03%	3.4	55.6	164.7	2.3	12.9	25.9
FA5%CS1%GX0.03%	5.0	24.6	102.5	2.1	13.7	27.6
FA10%CS1%GX0.03%	3.6	24.5	126.6	2.2	13.4	27.2
CS 1%	13.6	41.1	167.8	2.0	15.1	10.4

### 3.1.4 Fructanos de agave-goma xantana

En la Figura 3.5 se presenta la distribución de tamaño de los glóbulos que exhiben las emulsiones elaboradas con fructanos de agave al 1, 3, 5 y 10% en combinación con goma xantana al 0.03%. Se observa que los diámetros de las partículas tienden a ser similares a los presentados por las emulsiones elaboradas sólo con fructanos de agave (Cuadro 3.9 y 3.10), donde se distingue que la emulsión elaborada con fructanos de agave al 5% fue la que mostró diámetros de partícula más pequeños; sin embargo todos los sistemas presentan una tercera población, aun cuando se aplica ultrasonido durante la medición, no obstante al aplicar ultrasonido los diámetros de la tercera población son menores, lo que indica que existen agregados que se disgregan. Al comparar los diámetros de glóbulo de las emulsiones elaboradas con mezclas de fructanos de agave y goma xantana con los que exhibieron las emulsiones que contenían caseinato de sodio en su formulación se puede apreciar que los primeros son menores.

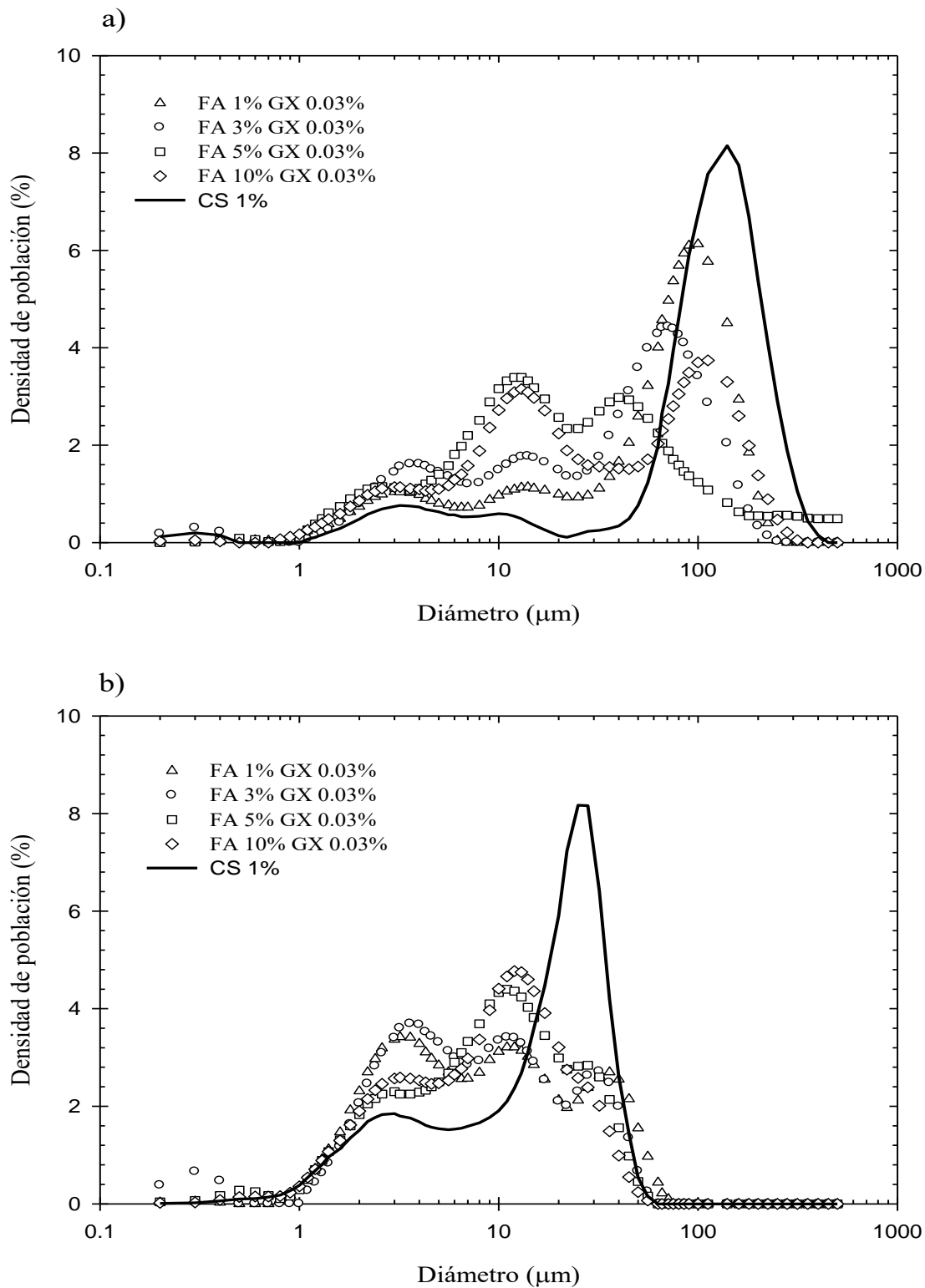


Figura 3.5 Distribución de tamaño de partícula de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con goma xantana (GX), sin ultrasonido a), con ultrasonido b).



*Cuadro 3.9* Modas de los diámetros de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con goma xantana (GX).

Emulsión	Diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ )					
	Sin ultrasonido			Con ultrasonido		
	Población 1	Población 2	Población 3	Población 1	Población 2	Población 3
<b>FA1% GX0.03%</b>	<b>3.2</b>	<b>14</b>	<b>108</b>	<b>3.2</b>	<b>11</b>	<b>37</b>
Desviación estándar	0.3	0	7	0	0	2.3
Coefficiente de variación (%)	11	0	6	0	0	6
<b>FA3% GX0.03%</b>	<b>4</b>	<b>13</b>	<b>111</b>	<b>3.5</b>	<b>11</b>	<b>33</b>
Desviación estándar	0.3	0.6	43	0.5	0	2
Coefficiente de variación (%)	9	4	39	14	0	7
<b>FA5% GX0.03%</b>	<b>2.6</b>	<b>12.2</b>	<b>54</b>	<b>11</b>	<b>28</b>	<b>-</b>
Desviación estándar	0	0.5	25	0	0	-
Coefficiente de variación (%)	0	4	46	0	0	-
<b>FA10% GX0.03%</b>	<b>2.6</b>	<b>14</b>	<b>92</b>	<b>3</b>	<b>12</b>	<b>28</b>
Desviación estándar	0.3	1.1	24	0.1	0.6	0
Coefficiente de variación (%)	13	8	26	4	5	0

*Cuadro 3.10* Valores al 10, 50 y 90% de fracción acumulada del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con goma xantana (GX).

Emulsión	Diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ )					
	Sin ultrasonido			Con ultrasonido		
	10%	50%	90%	10%	50%	90%
FA1% GX0.03%	4	75	155	1.9	6.9	33.2
FA3% GX0.03%	3.5	65.3	143.5	1.5	6.4	29.7
FA5% GX0.03%	3.4	16.2	89.6	1.8	8.4	26.8
FA10% GX0.03%	5.9	45.2	179.1	1.9	9.6	28.8

### 3.2 Comportamiento al flujo de sistemas acuosos y de emulsiones

En este apartado se presentan los resultados de los sistemas acuosos y sus emulsiones correspondientes. Sólo se caracterizaron los sistemas acuosos y emulsiones que contuvieron en su formulación goma xantana, ya que dichas emulsiones fueron las que permanecieron durante mayor tiempo estables. Se realizaron dos ciclos de ascenso-descenso, sin embargo, para el caso de las emulsiones, se presentan los resultados correspondientes a la primera curva de ascenso, ya que las curvas no se superpusieron,

debido a que el comportamiento reológico de las emulsiones fue dependiente del tiempo. El objetivo de estudiar las características de ambos sistemas fue el de poder relacionar sus propiedades reológicas con la estabilidad y el tamaño de partícula

### 3.2.1 Comportamiento al flujo de sistemas acuosos

#### 3.2.1.1 Fructanos de agave-caseinato de sodio-goma xantana

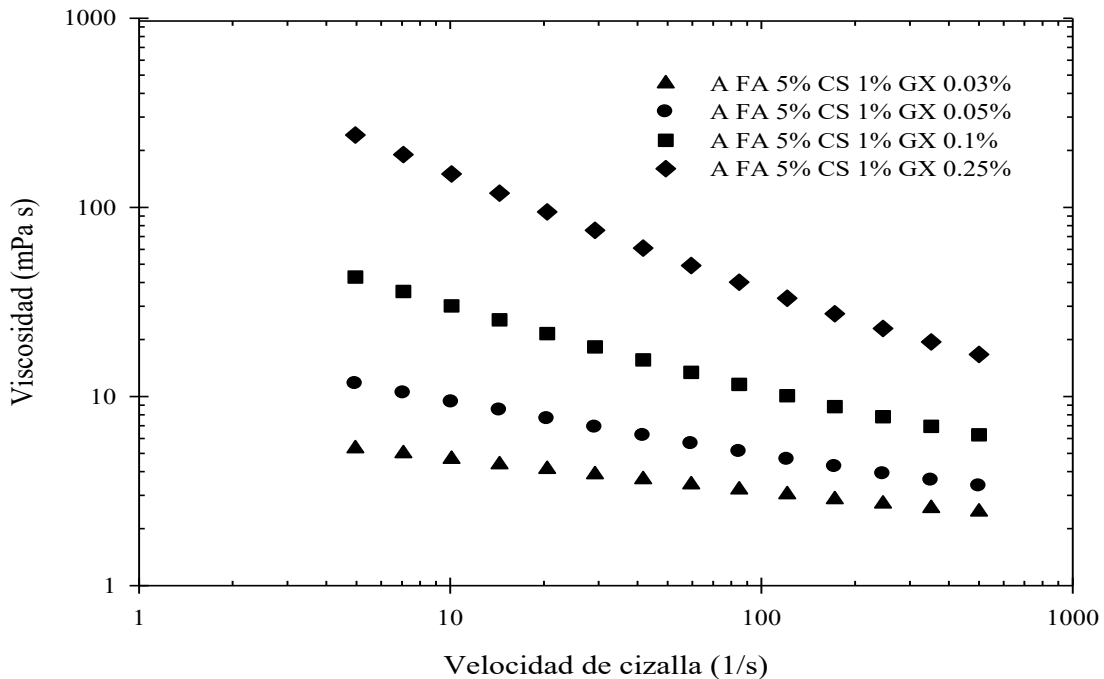
##### a) Efecto de la concentración de goma xantana

En la Figura 3.6 se muestra el comportamiento reológico de los sistemas acuosos elaborados con goma xantana al 0.03, 0.05, 0.1 y 0.25% en mezcla con fructanos de agave al 5% y caseinato de sodio al 1%. Se observa que estos exhiben un comportamiento fluidificante a la cizalla descrito por el modelo de la potencia, con excepción de la concentración de 0.25% de goma xantana el cual manifiesta un esfuerzo de cedencia, comportándose como un fluido Herschel-Bulkley. Se distingue que a mayor concentración de goma xantana aumenta el índice de consistencia y disminuye el índice de comportamiento al flujo, sin embargo, las curvas no son características del modelo de Carreau, que ha sido reportado para los sistemas acuosos de goma xantana (Kennedy *et al.*, 2014), lo que indica que tanto el caseinato de sodio, como los fructanos de agave interfieren en la formación de la doble hélice de la goma xantana.

##### b) Efecto de la concentración de fructanos de agave

En la Figura 3.7 se presenta el comportamiento reológico de los sistemas acuosos elaborados con fructanos de agave al 1, 3, 5 y 10% en mezcla con caseinato de sodio al 1% y goma xantana al 0.03%. Se observa que, a las concentraciones de 1, 3 y 5% de fructanos de agave éstos no afectan el comportamiento al flujo, ya que las curvas se sobreponen, sin embargo, a la concentración del 10% de fructanos de agave, hay una separación con las demás curvas. Al comparar los índices de comportamiento al flujo (Cuadro 3.12), se puede distinguir que éstos son iguales para todos los sistemas acuosos. Por otro lado, al comparar con el sistema acuoso elaborado sólo con goma xantana, es decir, tomando en cuenta el valor del parámetro  $p$ , del Cuadro 3.13, se puede distinguir que los sistemas que contienen fructanos de agave y caseinato de sodio son menos fluidificantes a la cizalla, lo cual puede indicar que el caseinato de sodio interfiere aún más con la formación de la doble hélice de

la goma xantana, y domina sobre los fructanos de agave, a excepción de la concentración del 10% de fructanos de agave, ya que dicha concentración es mucho mayor que la de caseinato de sodio.



*Figura 3.6* Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de los sistemas acuosos elaborados con diferentes concentraciones de goma xantana (GX) en mezcla con fructanos de agave (FA) y caseinato de sodio (CS).

*Cuadro 3.11* Parámetros reológicos de los sistemas acuosos elaborados con diferentes concentraciones de goma xantana (GX) en mezcla con fructanos de agave (FA) y caseinato de sodio (CS), evaluadas en un intervalo de velocidad de cizalla de 4-500 s<sup>-1</sup>.

Sistema	Modelo	K (mPa s <sup>n</sup> )	n (adimensional)	$\sigma_0$ (mPa)
<b>A FA5% CS1% GX0.03%</b>	<b>Potencia</b>	<b>8</b>	<b>0.8</b>	-
Desviación Estándar		1	0.002	-
Coefficiente de variación (%)		7	0.1	-
<b>A FA5% CS1% GX0.05%</b>	<b>Potencia</b>	<b>12</b>	<b>0.7</b>	-
Desviación Estándar		1	0.005	-
Coefficiente de variación (%)		3	0.7	-
<b>A FA5% CS1% GX0.1%</b>	<b>Potencia</b>	<b>180</b>	<b>0.5</b>	-
Desviación Estándar		0.8	0.031	-
Coefficiente de variación (%)		8	6	-
<b>A FA5% CS1% GX0.25%</b>	<b>Herschel-Bulkley</b>	<b>550</b>	<b>0.4</b>	<b>340</b>
Desviación Estándar		12	0.006	10
Coefficiente de variación (%)		2	1	4

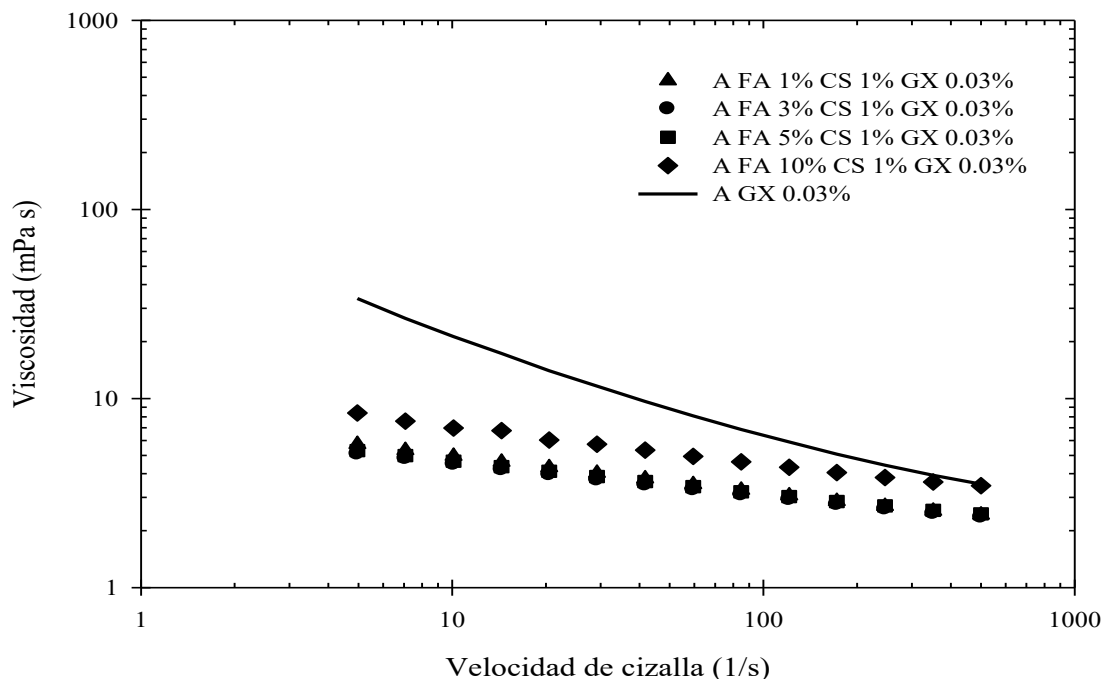


Figura 3.7 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de los sistemas acuosos elaborados con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con caseinato de sodio (CS) y goma xantana (GX).

Cuadro 3.12 Parámetros reológicos para el modelo de la potencia de los sistemas acuosos elaborados con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con caseinato de sodio (CS) y goma xantana (GX), evaluadas en un intervalo de velocidad de cizalla de 4-500 s<sup>-1</sup>.

Sistema	K (mPa s <sup>n</sup> )	n (adimensional)
<b>A FA1% CS1% GX0.03%</b>	<b>6</b>	<b>0.8</b>
Desviación Estándar	0.1	0.001
Coefficiente de variación (%)	2	0.1
<b>A FA3% CS1% GX0.03%</b>	<b>7</b>	<b>0.8</b>
Desviación Estándar	0.1	0.0005
Coefficiente de variación (%)	1	0.6
<b>A FA5% CS1% GX0.03%</b>	<b>8</b>	<b>0.8</b>
Desviación Estándar	0.8	0.002
Coefficiente de variación (%)	10	0.1
<b>A FA10% CS1% GX0.03%</b>	<b>10</b>	<b>0.8</b>
Desviación Estándar	0.5	0.005
Coefficiente de variación (%)	5	0.7

### 3.2.1.2 Fructanos de agave-goma xantana

En la Figura 3.8 se muestra el comportamiento reológico de los sistemas acuosos elaborados con fructanos de agave al 1, 3, 5 y 10% en combinación con goma xantana al 0.03%. Se observa que las curvas corresponden al modelo reológico de Carreau, ya que a bajas velocidades de cizalla la viscosidad es constante, es decir muestra un comportamiento newtoniano, al igual que a altas velocidades de cizalla, dicho comportamiento ha sido reportado para las soluciones acuosas de goma xantana, sin embargo, la  $\eta_0$ , que corresponde a la viscosidad a bajas velocidades de cizalla fue menor para todos los sistemas acuosos que contenían fructanos de agave en su formulación, lo que indica que dichos sistemas son menos viscosos. Al igual, se distingue que existe un efecto de la concentración de fructanos de agave, ya que conforme aumenta la concentración de éstos, la  $\eta_0$  disminuye (Cuadro 3.13), lo cual podría indicar que los fructanos de agave impiden la formación de las dobles hélices de la goma xantana, evitando que ésta atrape agua y por ende ésta confirió menor viscosidad al sistema, indicando que a mayor concentración de fructanos de agave, hubo una mayor interferencia de los mismos sobre la goma xantana. Por otro lado, los sistemas acuosos presentan un valor de  $\eta_\infty$ , que corresponde a la viscosidad a altas velocidades de cizalla, similar entre sí, es decir, tiende a aproximarse a un valor constante independientemente de la concentración de fructanos, aunque inferior al que presenta el sistema que sólo contiene goma xantana, corroborando la interferencia antes mencionada.

### 3.2.2 Comportamiento al flujo de emulsiones

#### 3.2.2.1 Fructanos de agave-caseinato de sodio-goma xantana

##### a) Efecto de la concentración de goma xantana

En la Figura 3.9 se muestra el comportamiento reológico de los sistemas acuosos y sus emulsiones correspondientes, elaborados con goma xantana al 0.03, 0.05, 0.1 y 0.25% en mezcla con fructanos de agave al 5% y caseinato de sodio al 1%.

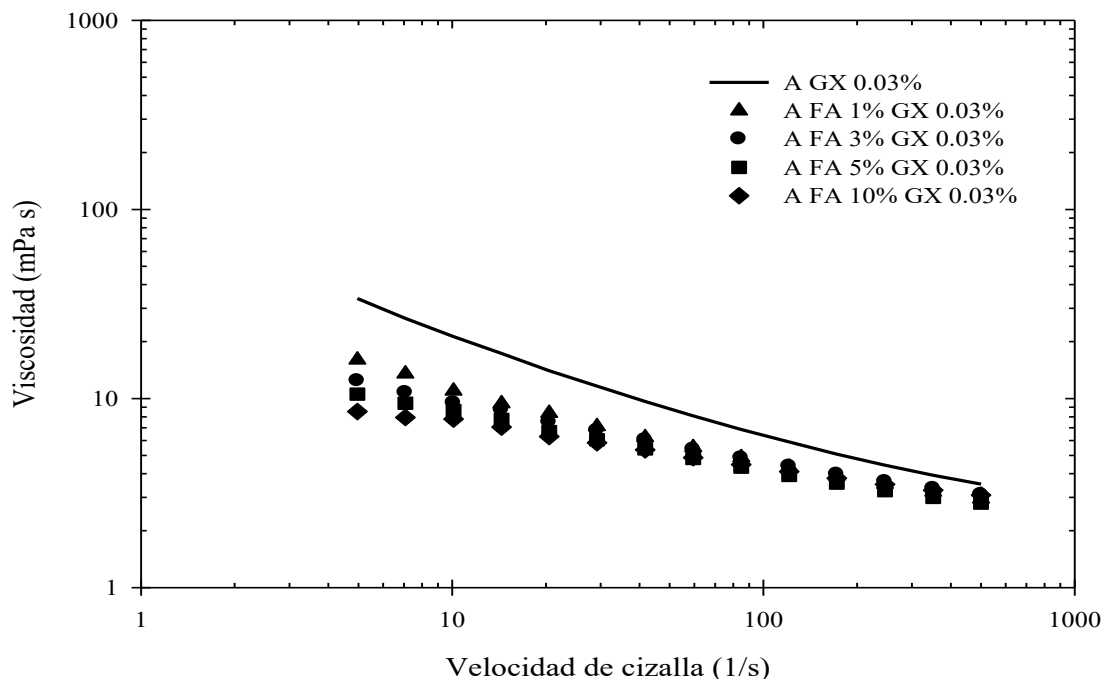
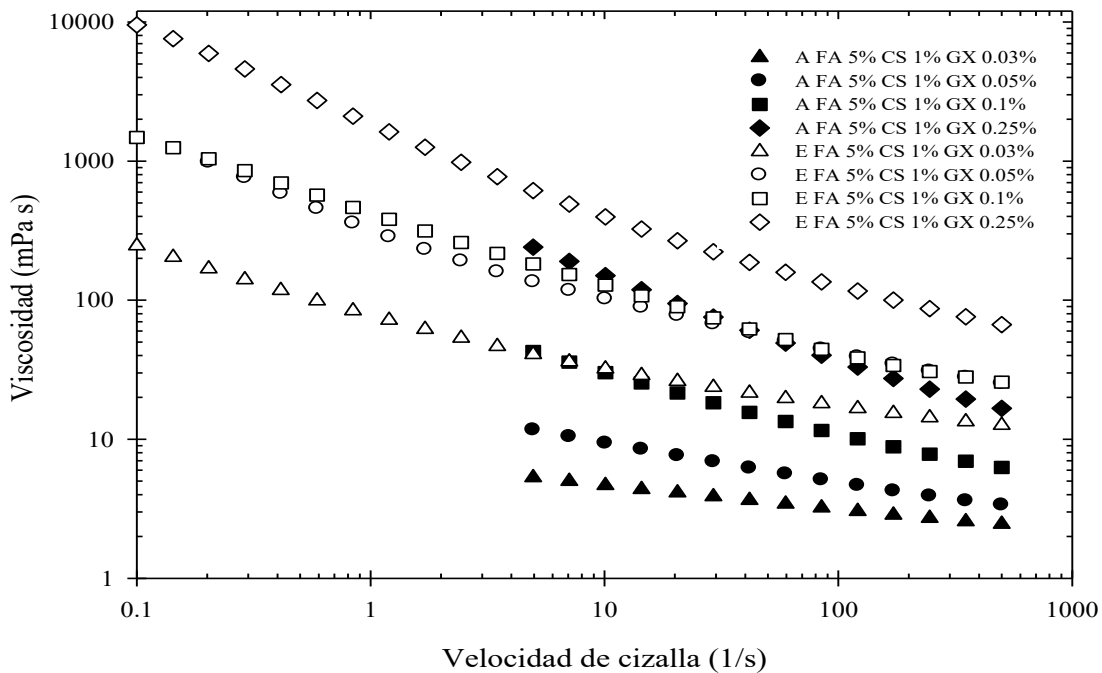


Figura 3.8 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de los sistemas acuosos elaborados con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con goma xantana (GX).

Cuadro 3.13 Parámetros reológicos para el modelo de Carreau de los sistemas acuosos elaborados con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con goma xantana (GX), evaluadas en un intervalo de velocidad de cizalla de 4-500 s<sup>-1</sup>.

Sistema	$\eta_0$ (mPa s)	$\eta_\infty$ (mPa s)	p (adimensional)	$\lambda$ (s)
<b>A FA1% GX0.03%</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>0.2</b>	<b>1.1</b>
Desviación Estándar	1	0.1	0.01	0.02
Coefficiente de variación (%)	5	0.06	4	2
<b>A FA3%GX0.03%</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>0.2</b>	<b>0.3</b>
Desviación Estándar	1.3	0.07	0.007	0.008
Coefficiente de variación (%)	9	0.05	3	2
<b>A FA5%GX0.03%</b>	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>0.2</b>	<b>0.6</b>
Desviación Estándar	0.7	0.1	0.005	0.03
Coefficiente de variación (%)	6	0.07	2	5
<b>A FA10%GX0.03%</b>	<b>9</b>	<b>15</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>
Desviación Estándar	0.7	0.05	0.01	0.03
Coefficiente de variación (%)	8	0.3	5	16
<b>A GX0.03%</b>	<b>30</b>	<b>18</b>	<b>0.3</b>	<b>0.2</b>
Desviación Estándar	0.07	0.0007	0.003	0.00006
Coefficiente de variación (%)	0.2	0.3	0.009	0.31

Se observa que las emulsiones presentan un comportamiento fluidificante a la cizalla descrito por el modelo Herschel Bulkley, tal comportamiento se caracteriza porque existe un esfuerzo de cedencia, es decir, que se requiere de un esfuerzo mínimo de corte para que las emulsiones comiencen a fluir, esto podría explicarse por la contribución de la fase dispersa, indicando que existen agregados que se disgregan al aumentar la velocidad de cizalla, y que después el comportamiento es descrito por el modelo de la potencia, en el que la viscosidad disminuye conforme aumenta la velocidad de cizalla. Al igual puede verse que los valores de la viscosidad de las emulsiones, se ubican por encima de su fase acuosa correspondiente, y que hay una influencia de la concentración de goma xantana sobre el comportamiento al flujo de las emulsiones, ya que al aumentar la concentración de goma xantana, aumenta el esfuerzo de cedencia que exhiben las emulsiones (Cuadro 3.14).



*Figura 3.9* Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de los sistemas acuosos y sus emulsiones correspondientes elaboradas con diferentes concentraciones de goma xantana (GX) en mezcla con fructanos de agave (FA) y caseinato de sodio (CS).

*Cuadro 3.14* Parámetros reológicos para el modelo Herschel Bulkley de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de goma xantana (GX) en mezcla con fructanos de agave (FA) y caseinato de sodio (CS), evaluadas en un intervalo de velocidad de cizalla de 0.1-500 s<sup>-1</sup>.

Sistema	K (mPa s <sup>n</sup> )	n (adimensional)	$\sigma_0$ (mPa)
<b>E FA5% CS1% GX0.03%</b>	<b>40</b>	<b>0.81</b>	<b>250</b>
Desviación Estándar	5	0.01	5
Coefficiente de variación (%)	12	2	2
<b>E FA5% CS1% GX0.05%</b>	<b>140</b>	<b>0.69</b>	<b>2000</b>
Desviación Estándar	10	0.01	61
Coefficiente de variación (%)	7	1	3
<b>E FA5% CS1% GX0.1%</b>	<b>160</b>	<b>0.72</b>	<b>2115</b>
Desviación Estándar	20	0.04	30
Coefficiente de variación (%)	12	5	1
<b>E FA5% CS1% GX0.25%</b>	<b>670</b>	<b>0.63</b>	<b>8200</b>
Desviación Estándar	0.06	0.001	70
Coefficiente de variación (%)	9	0.1	0.8

b) Efecto de la concentración de fructanos de agave

En la Figura 3.10 se muestra el comportamiento reológico de los sistemas acuosos y sus emulsiones correspondientes elaborados con fructanos de agave al 1, 3, 5 y 10% en mezcla con caseinato de sodio al 1% y goma xantana al 0.03%. El comportamiento reológico de las emulsiones es descrito por el modelo Herschel Bulkley, se distingue que hay una marcada separación de las emulsiones de sus respectivos sistemas acuosos, y que la concentración de fructanos de agave no afecta al comportamiento reológico, y que tanto los esfuerzos de cedencia, así como el índice de comportamiento al flujo son similares entre sí (Cuadro 3.15), al comparar también los índices de consistencia con los de sus respectivos sistemas acuosos, se observa que estos son similares. Eso podría explicarse a que en dichas emulsiones hay un predominio del caseinato de sodio, ya que es éste el que determina el tamaño de partícula de las emulsiones.



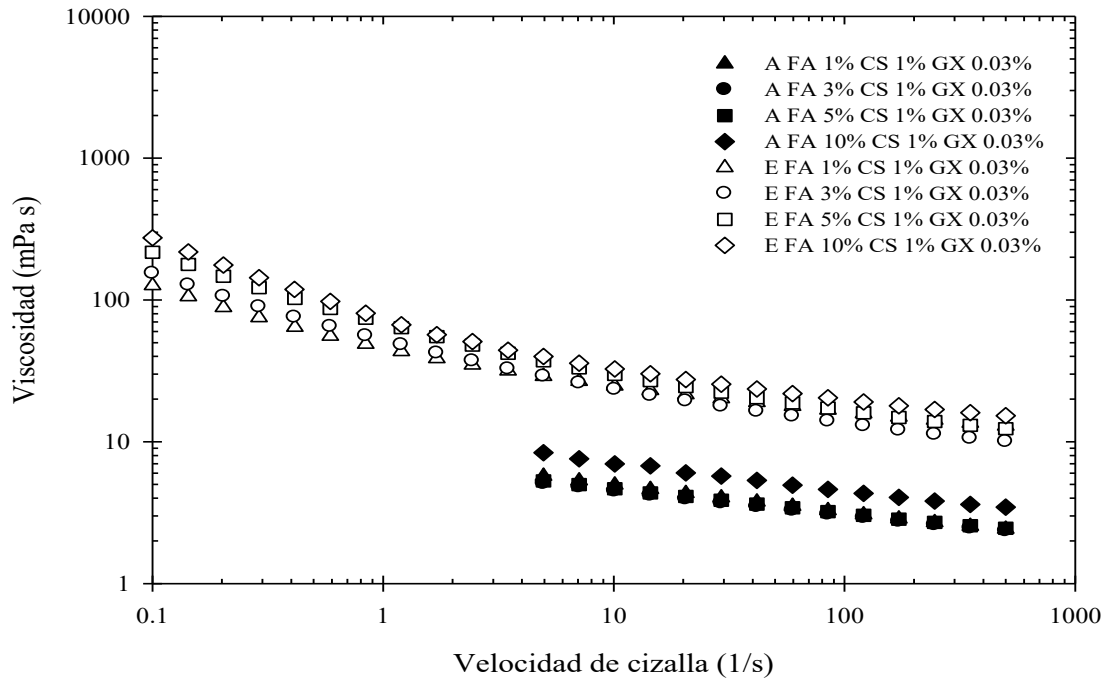


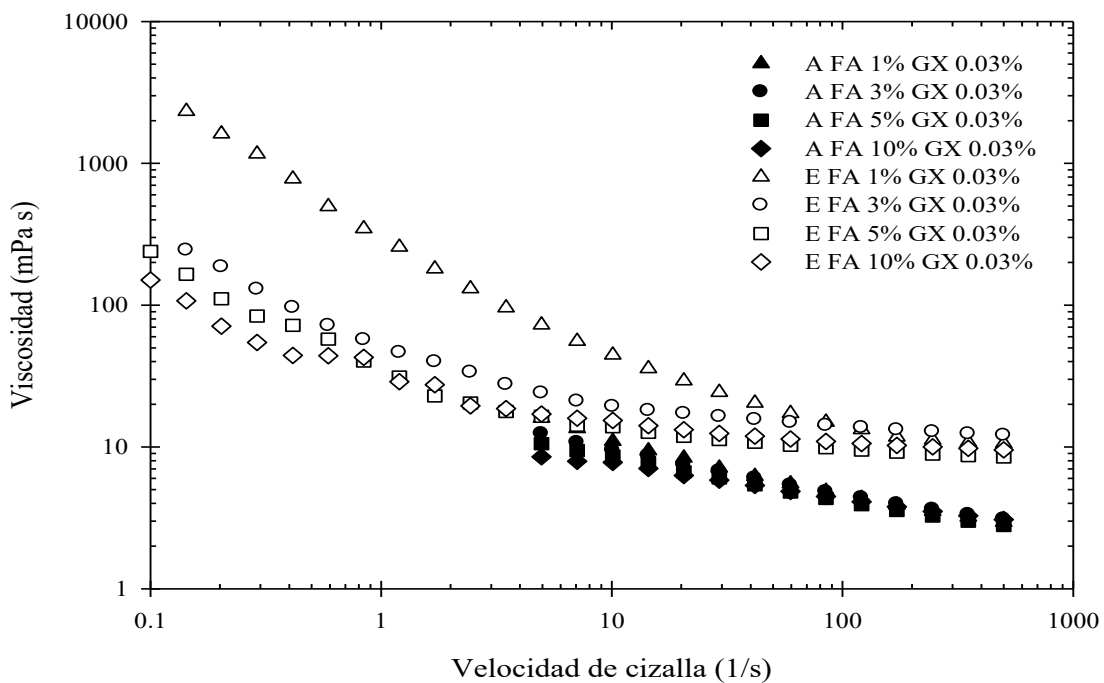
Figura 3.10 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de los sistemas acuoso y sus emulsiones correspondientes elaborados con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con caseinato de sodio (CS) y goma xantana (GX).

Cuadro 3.15 Parámetros reológicos para el modelo Herschel Bulkley de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con goma xantana (GX) y caseinato de sodio (CS), evaluadas en un intervalo de velocidad de cizalla de 0.1-500  $s^{-1}$ .

Sistema	K (mPa s <sup>n</sup> )	n (adimensional)	$\sigma_0$ (mPa)
<b>E FA1% CS1% GX0.03%</b>	<b>30</b>	<b>0.82</b>	<b>120</b>
Desviación Estándar	0.7	0.012	11
Coefficiente de variación (%)	2	1	9
<b>E FA3% CS1% GX0.03%</b>	<b>30</b>	<b>0.86</b>	<b>180</b>
Desviación Estándar	2	0.007	3
Coefficiente de variación (%)	7	0.8	2
<b>E FA5% CS1% GX0.03%</b>	<b>40</b>	<b>0.81</b>	<b>210</b>
Desviación Estándar	3	0.01	6
Coefficiente de variación (%)	7	2	3
<b>E FA10% CA1% GX0.03%</b>	<b>40</b>	<b>0.84</b>	<b>290</b>
Desviación Estándar	2	0.004	5
Coefficiente de variación (%)	5	0.5	2

### 3.2.2.2 Fructanos de agave-goma xantana

En la Figura 3.11 se muestra el comportamiento reológico de las emulsiones y sus respectivos sistemas acuosos elaborados con fructanos de agave al 1, 3, 5 y 10% en mezcla con goma xantana al 0.03%. Se distingue que la concentración de fructanos de agave afecta el comportamiento reológico de las emulsiones elaboradas, donde se observa que a la concentración del 1% de fructanos de agave las emulsiones presentan un mayor esfuerzo de cedencia, por otro lado las emulsiones elaboradas con fructanos de agave al 3, 5 y 10% muestran un esfuerzo de cedencia similar entre sí (Cuadro 3.13); lo cual podría indicar que a las concentración de 1 % la cantidad de fructanos de agave no es suficiente para cubrir la interfase por lo cual se forman en el sistema una mayor cantidad de agregados, como se discutió en la Figura 3.5 y Cuadro 3.9.



*Figura 3.11* Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de los sistemas acuosos y sus emulsiones correspondientes elaborados con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con goma xantana (GX).

*Cuadro 3.16* Parámetros reológicos para el modelo Herschel Bulkley de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con goma xantana (GX), evaluadas en un intervalo de velocidad de cizalla de 0.1-500 s<sup>-1</sup>.

Sistema	K (mPa s <sup>n</sup> )	n (adimensional)	$\sigma_0$ (mPa)
<b>E FA1%GX0.03%</b>	<b>10</b>	<b>0.94</b>	<b>2800</b>
Desviación Estándar	0.2	0.01	70
Coeficiente de variación (%)	2	1	2
<b>E FA3%GX0.03%</b>	<b>20</b>	<b>0.92</b>	<b>400</b>
Desviación Estándar	1	0.007	20
Coeficiente de variación (%)	5	0.76	5
<b>E FA5%GX0.03%</b>	<b>19</b>	<b>0.90</b>	<b>370</b>
Desviación Estándar	0.7	0.02	12
Coeficiente de variación (%)	4	2	3
<b>E FA10%GX0.03%</b>	<b>10</b>	<b>0.93</b>	<b>210</b>
Desviación Estándar	0.3	0.005	22
Coeficiente de variación (%)	3	0.5	10

### 3.3 Estabilidad de emulsiones por transmisión-retrodispersión de luz

Para el análisis de los datos obtenidos de las diferentes emulsiones elaboradas, se separaron los gráficos en tres zonas para poder examinar los distintos procesos de desestabilización que ocurrieron simultáneamente (clarificado, aumento de tamaño de partícula y coalescencia). En la Figura 3.12 se presenta el gráfico que representa la evolución de los procesos de inestabilidad de las emulsiones en un perfil de retrodispersión de luz.

La evolución del pico de clarificado se analizó en un intervalo de los 6.5 a 30 mm de altura del tubo, ya que ésta fue la distancia máxima que alcanzó el clarificado en los diferentes sistemas. Al mismo tiempo que se forma el pico de clarificado se produce una pérdida en la retrodispersión de luz en la parte superior del tubo a una altura en los 49 a 59 mm indicando que existe coalescencia en esa zona.

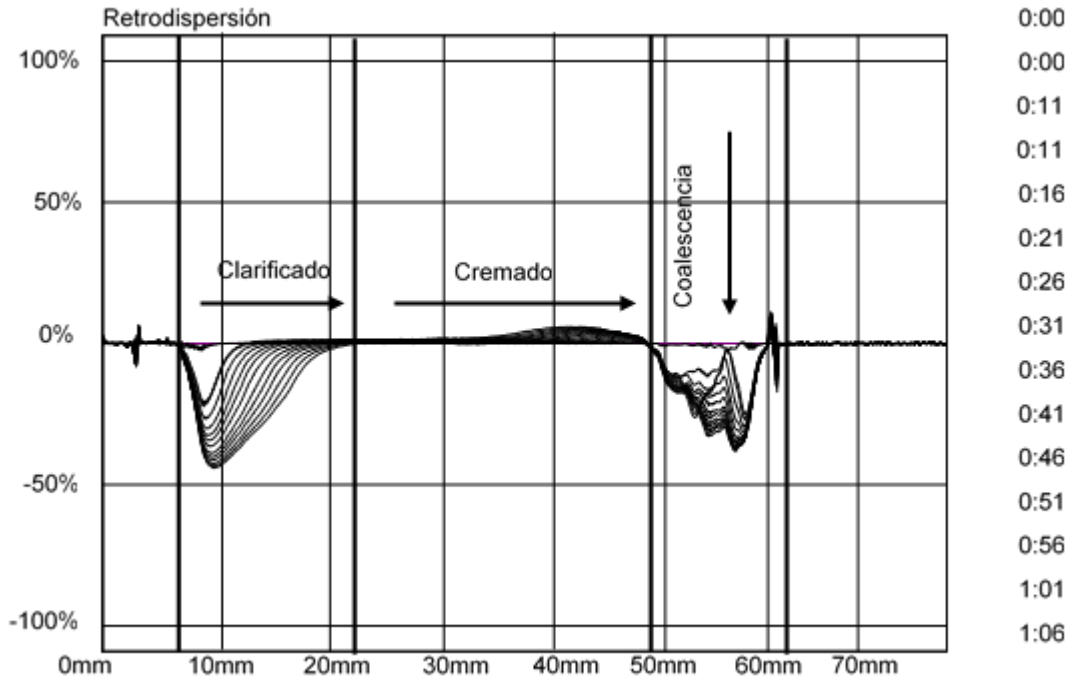


Figura 3.12 Perfil de retrodispersión de luz de las emulsiones elaboradas

### 3.3.1 Fructanos de agave

En el Cuadro 3.17 se presenta el tiempo que las emulsiones elaboradas con fructanos de agave al 1, 3, 5, 10, 15 y 20% permanecieron estables sin presentar cambios en el clarificado. Al realizar un análisis de varianza para los tiempos en los que las emulsiones permanecieron estables con un nivel de significancia del 1% ( $\alpha=0.01$ ) se observa que existe diferencia significativa entre los tiempos de estabilidad de las diferentes emulsiones elaboradas, y al realizar pruebas a posteriori se distingue que entre las emulsiones elaboradas con 1 y 3% de fructanos de agave no existe diferencia significativa entre sus tiempos de estabilidad, al igual que entre las emulsiones elaboradas con 15 y 20% de fructanos de agave, en el cuadro 3.17 se encuentran marcadas por superíndices iguales las concentraciones en las que no hay diferencia significativa.

Por otra parte la emulsión elaborada al 5% de fructanos de agave fue la que alcanzó una menor distancia de clarificado, mientras que la emulsión elaborada al 20% de fructanos de agave fue la que permaneció durante menos tiempo estable, permaneciendo sin presentar cambios en el clarificado 0.008 horas, y alcanzando una distancia del mismo de 29.8mm,

esto puede relacionarse con la distribución de tamaño de glóbulo que presentaron las emulsiones, donde la emulsión elaborada con la concentración del 5% de fructanos de agave fue la que presentó menores tamaños de glóbulo, por lo que estos no tendieron a unirse entre sí, evolucionando más lentamente el pico de clarificado.

*Cuadro 3.17* Espesor de clarificado y tiempo de estabilidad de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA).

Emulsión	Espesor de clarificado (mm)	Tiempo de inicio del clarificado (h)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
FA1%	12.8	0.25 <sup>a</sup>	0.001	0.5
FA3%	11.8	0.25 <sup>a</sup>	0.001	0.5
FA5%	10.3	0.20 <sup>b</sup>	0.008	4
FA10%	20.6	0.35 <sup>c</sup>	0.021	6
FA15%	26.8	0.02 <sup>d</sup>	0.0002	1
FA20%	29.8	0.008 <sup>d</sup>	0.0004	8

\*Análisis estadístico, diferencia significativa entre concentración de fructanos de agave si: a, b, c (letras diferentes).

### 3.3.2 Fructanos de agave-caseinato de sodio

En la Figura 3.13 se muestran las cinéticas de clarificado de las emulsiones elaboradas 1, 3, 5 y 10% de fructanos de agave en mezcla con caseinato de sodio al 1%, y de la emulsión elaborada con 1% de caseinato de sodio. Estas curvas se construyen seleccionando un espesor definido de la zona de clarificado, aplicando el programa de espesor absoluto y graficando el espesor en función del tiempo. Las curvas se ajustaron a una línea recta con un coeficiente de correlación mayor a 0.99, de las cuales se pudo determinar, por medio de la pendiente, la velocidad a la que clarificaron las emulsiones. En ésta se puede apreciar marcadamente la diferencia entre las diferentes concentraciones de fructanos de agave y como afectan a la velocidad en la que se forma el clarificado.

En el Cuadro 3.18 se muestran las velocidades a las que las emulsiones clarificaron. En comparación con la emulsión elaborada con solo caseinato de sodio, las emulsiones elaboradas con mezclas fructanos-caseinato manifiestan una menor velocidad de

clarificado, lo que podría explicarse por una interacción atractiva entre el caseinato de sodio y los fructanos de agave, donde éstos tienden a depositarse sobre las micelas de caseína, sin embargo la emulsión elaborada en combinación con 1% de fructanos de agave exhibió una mayor velocidad de clarificado, lo que podría indicar que al 1% la concentración de fructanos no es suficiente para cubrir la interfase con base en las curvas de adsorción de fructanos reportadas en Sosa-Herrera *et al.*, 2016, por lo que tienden a formarse más fácilmente agregados que migran rápidamente hacia la parte superior del tubo. Por otro lado, se aprecia que conforme aumenta la concentración de fructanos de agave las emulsiones tienden a ser más estables, siendo más estable la emulsión elaborada a la concentración del 5%, no obstante, al aumentar la concentración de fructanos de agave al 10% la velocidad aumenta nuevamente.

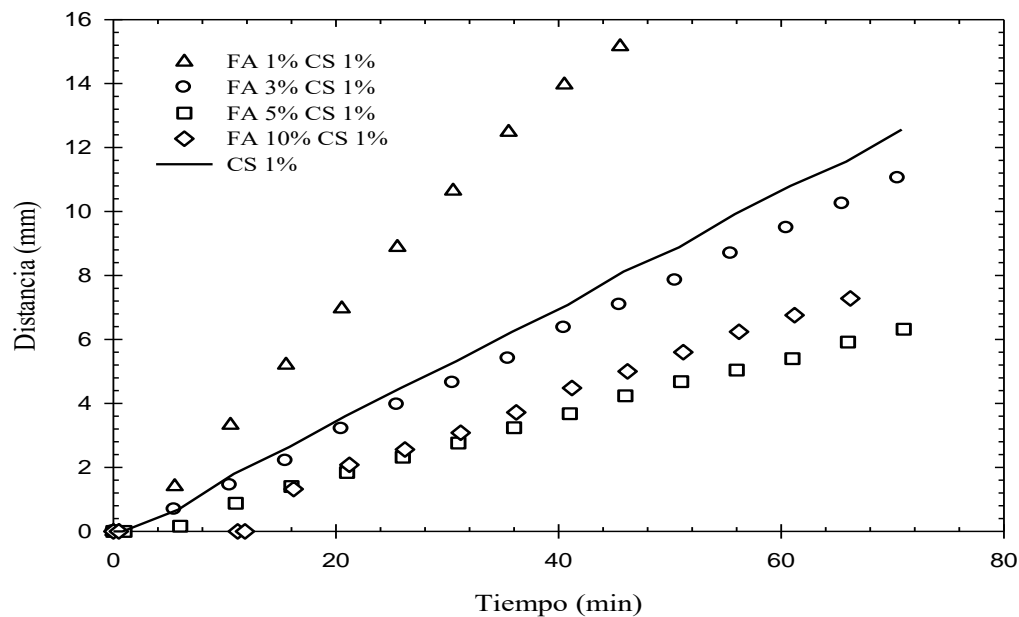


Figura 3.13 Cinética de clarificado de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con caseinato de sodio (CS).

*Cuadro 3.18* Velocidad de clarificado de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con caseinato de sodio (CS).

Emulsión	Velocidad de clarificado (mm/min)
<b>FA1% CS1%</b>	<b>0.35</b>
Desviación estándar	0.004
Coefficiente de variación (%)	1.1
<b>FA3% CS1%</b>	<b>0.16</b>
Desviación estándar	0.003
Coefficiente de variación (%)	2
<b>FA5% CS1%</b>	<b>0.08</b>
Desviación estándar	0.008
Coefficiente de variación (%)	9.5
<b>FA10% CS1%</b>	<b>0.13</b>
Desviación estándar	0.01
Coefficiente de variación (%)	7.3
<b>CS1%</b>	<b>0.18</b>
Desviación estándar	0.009
Coefficiente de variación (%)	5

### 3.3.3 Fructanos de agave-caseinato de sodio-goma xantana

#### a) Efecto de la concentración de goma xantana

En el Cuadro 3.19 se muestran los tiempos en los que las emulsiones elaboradas con goma xantana al 0.03, 0.05, 0.1 y 0.25% en mezcla con fructanos de agave al 5% y caseinato de sodio al 1% permanecieron estables sin presentar cambios en el clarificado. Se observa que, en comparación con las emulsiones elaboradas con fructanos de agave y caseinato de sodio, éstas presentaron menores espesores de clarificado, siendo la emulsión que permaneció durante más tiempo estable la elaborada al 0.25% de goma xantana, al relacionar con el tamaño de glóbulo se distingue que dicha concentración fue la que presentó los diámetros de glóbulo más pequeño (Figura 3.3 y Cuadro 3.5), y al relacionar con tamaño el comportamiento al flujo de la emulsión, se observa que ésta fue la que presentó una mayor esfuerzo de cedencia, que indicó que existían más agregados en comparación con las otras concentraciones, sin embargo, ésta fue la que alcanzó una mayor distancia de clarificado en comparación con los otros sistemas, alcanzando los 7.3 mm, es decir la separación entre fases fue mayor. Por otro lado, la emulsión elaborada con goma xantana al 0.03% permaneció estable por un tiempo de 45.2 horas y alcanzó una distancia de clarificado de 2.5 mm, por lo que puede considerarse como la más estable.

*Cuadro 3.19* Espesor de clarificado y tiempo de estabilidad de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de goma xantana (GX) en mezcla con fructanos de agave (FA) y caseinato de sodio (CS).

Emulsión	Espesor de clarificado (mm)	Tiempo de inicio del clarificado (h)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
FA5%CS1%GX0.03%	2.5	45.2	0	0
FA5%CS1%GX0.05%	2.5	23.1	0	0
FA5%CS1%GX0.1%	4.6	96.6	0.04	0.05
FA5%CS1%GX0.25%	7.3	141.5	0.03	0.025

b) Efecto de la concentración de fructanos de agave

En el Cuadro 3.20 se resumen los tiempos en los que las emulsiones elaboradas con fructanos de agave al 1, 3, 5 y 10% en mezcla con caseinato de sodio al 1% y goma xantana al 0.03% se mantuvieron estables sin exhibir cambios en el clarificado. La emulsión elaborada con fructanos de agave al 5% fue la que permaneció durante más tiempo estable, alcanzando un tiempo de 45.2 horas sin mostrar cambios, también dicha emulsión fue la que presentó una menor distancia de clarificado, alcanzando los 7.3 mm. Por otra parte, la emulsión elaborada con fructanos de agave al 10% fue la que manifestó mayores cambios, siendo ésta la más inestable, alcanzó una distancia de clarificado fue de 28.6 mm y permaneció estable durante 1 hora.

*Cuadro 3.20* Espesor de clarificado y tiempo de estabilidad de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla con caseinato de sodio (CS) y goma xantana (GX).

Emulsión	Espesor de clarificado (mm)	Tiempo de inicio del clarificado (h)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
FA1%CS1%GX0.03%	8.9	1.2	0.03	2.5
FA3%CS1%GX0.03%	9.4	1.5	0.01	0.7
FA5%CS1%GX0.03%	7.3	45.2	0.01	0.02
FA10%CS1%GX0.03%	28.6	1	0.02	2

Al comparar los tiempos de estabilidad de las emulsiones elaboradas con fructanos de agave-caseinato de sodio-goma xantana, con los obtenidos de las emulsiones elaboradas



con fructanos de agave-caseinato de sodio se distingue que éstos fueron mayores, debido a la presencia de goma xantana en la formulación que debido a que imparte viscosidad a la fase continua evita el movimiento de las partículas o flóculos de aceite.

### 3.3.4 Fructanos de agave-goma xantana

En el Cuadro 3.21 se muestran los tiempos en los que las emulsiones elaboradas con fructanos de agave al 1, 3, 5 y 10% en mezcla con goma xantana al 0.03% permanecieron estables, sin presentar cambios en el clarificado. Se aprecia que conforme aumenta la concentración de fructanos de agave las emulsiones tienden a ser más inestables, siendo la emulsión elaborada con fructanos de agave al 10% la que mostró cambios más rápidamente.

*Cuadro 3.21* Tiempo de estabilidad y espesor de clarificado de las emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de fructanos de agave (FA) en mezcla goma xantana (GX).

Emulsión	Espesor de clarificado (mm)	Tiempo de inicio del clarificado (h)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
FA1%GX0.03%	9.8	0.69	0.005	0.7
FA3%GX0.03%	10.3	0.68	0.005	0.7
FA5%GX0.03%	12.1	0.34	0.003	0.9
FA10%GX0.03%	13.8	0.10	0.001	0.1

Al contrastar los tiempos en los que las emulsiones fueron estables, con los que exhibieron las emulsiones que en su formulación contenían caseinato de sodio, se distingue que las que contenían caseinato de sodio permanecieron durante un mayor tiempo estables; esto podría explicarse debido a que el caseinato estabiliza los glóbulos de aceite de las emulsiones, evitando la coalescencia a través de repulsión electrostática y estérica entre las mismas (Partanen *et al.*, 2009). Además de la posible formación de un complejo entre el caseinato de sodio y los fructanos de agave, considerando que los componentes de la superficie activa de la proteína forman una capa primaria alrededor de las gotas de aceite e interactúan con el polisacárido que forma una capa secundaria alrededor de la proteína (Sosa-Herrera *et al.*, 2016).

## CONCLUSIONES

Al estudiar el efecto de la concentración de fructanos de agave en el tamaño de partícula y la estabilidad de las emulsiones elaboradas, se observó que la concentración de 5% de fructanos de agave presentó menores diámetros de los glóbulos de aceite y una mayor estabilidad en comparación con los sistemas elaborados a menores o mayores concentraciones. Al combinarse con caseinato de sodio, los fructanos de agave tienden a aumentar el tiempo de estabilidad de las emulsiones. Por su parte, la goma xantana a la concentración de 0.03%, aumentó la estabilidad de las emulsiones debido a que evitó la migración hacia la superficie de las gotas de aceite.

El comportamiento reológico de los sistemas acuosos elaborados con fructanos de agave, caseinato de sodio y goma xantana está dominado por las propiedades de flujo de la goma xantana, sin embargo, éste se vio influenciado por la presencia de los fructanos de agave y el caseinato de sodio, por lo que los sistemas acuosos de éstas mezclas presentaron una menor viscosidad en comparación con el sistema elaborado con sólo goma xantana.

El comportamiento al flujo de las emulsiones fue determinado por la contribución de la fase dispersa, los sistemas exhibieron un comportamiento no newtoniano, característico de emulsiones que posiblemente presentan floculación por agotamiento, además, manifestaron un esfuerzo de cedencia, que indicó la probable formación de una red tridimensional entre los flóculos de aceite y las biomoléculas empleadas, que se disgregaban al aumentar la velocidad de cizalla, siendo así los sistemas fluidificantes a la cizalla.

En esta investigación se demostró que los fructanos de agave tienen potencial aplicación como agente coadyuvante en la formación y estabilización de emulsiones, empleando bajas concentraciones de caseinato de sodio y goma xantana, asimismo se logró observar una posible interacción entre los fructanos de agave y el caseinato de sodio, donde éstos podrían mejorar la adsorción del caseinato de sodio en la interfase aceite-agua, beneficiando las características de las emulsiones elaboradas.

## REFERENCIAS

- Arrizon, J., Morel, S., Gschaedler, A., 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. D. (2006). *Química de los Alimentos*. 4ª Ed., Ciudad de México, México, Pearson Educación.
- Barnes, H. A. (2004). The rheology of emulsions. En: D. N. Pestev. (Ed.), *Emulsions: Structure, Stability and Interactions* (pp. 721-759). E. U. A: Elsevier.
- Binks, B. P. (1998). Emulsions-Recent Advances in Understanding. En: B. P. Binks. (Ed.), *Modern Aspects of Emulsion Science* (pp. 1-55). Reino Unido; The Royal Society of Chemistry.
- Cardona, C. T. S., Casanova, H.F. (2004). Emulsiones O/W estabilizadas con caseinato de sodio: efecto de los iones de calcio. Concentración de proteína y temperatura. *Vitae*, 11, 13-19.
- Charalambous, G., Doxastakis, G., (1989), *Food emulsifiers: Chemistry, Technology, Functional properties and Applications*. Nueva York, E.U.A., Elsevier.
- Cheftel, J. C., Cuq J. L., Lorient, D. (1989). *Proteínas alimentarias. Bioquímica-Propiedades funcionales-Valor nutricional-Modificaciones químicas*. Zaragoza, España, Acribia.
- CILAS. (2004). Particle size analyzer CILAS 920, 930e, 1064 & 1180 user manual. Documento interno LAPRYFAL, FES Cuautitlán, UNAM.
- Crispín-Isidro, G., Lobato-Calleros, C., Espinosa-Andrews, H., Álvarez-Ramírez, J., Vernon-Carter, E. J. (2014). Effect of inulin and agave fructans addition on the rheological, microstructural and sensory properties of reduced-fat stirred yogurt. *Food Science and Technology*, 30, 1-7.
- Darling, D. F., Birkett, R. J. (1986). Food Colloids in Practice. En E. Dickinson. (Ed.), *Food Emulsions and Foams* (pp. 1-29). Cambridge: Elsevier.

- Dickinson, E. (1998). Rheology of emulsions-The relationship to structure and stability. En: B. P. Binks. (Ed.), *Modern Aspects of Emulsion Science* (pp. 145-171). Reino Unido; The Royal Society of Chemistry.
- Dickinson, E., (1999). Caseins in emulsions: interfacial properties and interactions. *International Dairy Journal*, 9, 305-312.
- Fennema, O. R. (1993). *Química de los alimentos*. 2ª Ed. Zaragoza, España, Acribia.
- Fernández-Sevilla, J. M. (2005). Estructura y función de las proteínas. En: *Ampliación de la Tecnología de los alimentos*, (pp. 1-23). Almería, España.
- García-Ochoa, F., Santos, V. E., Casas, J. A., Gómez, E., (2000). Xanthan gum: production, recovery, and properties. *Biotechnology Advances*, 18, 549-579.
- Ghosh, K. A., Bandyopadhyay, P. (2012). Polysaccharide-protein interactions and their relevance in food colloids. En: *The Complex World of Polysaccharides*. (pp. 396-408). Desiree Nedra Karunaratne. Bangalore, India.
- Kennedy, J. R. M., Kent, K. E., Brown, J. R. (2014). Rheology of dispersions of xanthan gum, locust bean gum and mixed biopolymer gel with silicon dioxide nanoparticles. *Materials Science and Engineering*, 48, 347-353.
- Krstonošić, V., Dokić, L., Nikolić, I., Milanović, M. (2014). Influence of xanthan gum on oil-in-water emulsion characteristics stabilized by OSA starch. *Food Hydrocolloids*, 45, 9-17.
- Larsson, K., Friberg, S. E. (1990). *Food Emulsions*. 2ª Ed., Nueva York, E.U. A. Marcel Dekker Inc.
- Liang, Y., Gillies, G., Patel, H., Matia-Merino, L., Ye, A., Golding, M. (2013). Physical stability, microstructure and rheology of sodium-caseinate stabilized emulsions as influenced by protein concentration and non-adsorbing polysaccharides. *Food Hydrocolloids*, 36, 145-255.
- Martínez-Padilla, L. P. (2012). Guía rápida de uso del reómetro MCR 301 Physica. Documento interno LAPRYFAL, FES Cuautitlán, UNAM.

- McClements, D. J. (2004). *Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques*. 2<sup>a</sup> Ed. CRC Press. Massachusetts, EUA.
- Méndez-Sanchez, A. F., Pérez-Trejo, L., Paniagua-Mercado, A. M. (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). *Physicorum Educación*, 4, 237-245.
- Mengual, O., Meunier, G., Cayré, I., Puech, K., Snambre, P. (1999). TURBISCAN MA 2000: multiple light scattering measurement for concentrated emulsion and suspension instability analysis. *Talanta*, 50, 445-456.
- Muñoz, J., Alfaro, M. C., Zapata, I. (2007). Avances en la formulación de emulsiones. *Grasas y Aceites*, 58, 64-73.
- Ohaus Corporation. (2001). Manual de instrucciones Analizador de Humedad MB45. Documento interno LAPRYFAL, FES Cuautitlán, UNAM.
- Partanen, R., Paananen, A., Forsell, P., Linder, M. B., Lille, M., Buchert, J., Lantto, R. (2009). Effect of transglutaminase-induced cross-linking of sodium caseinate on the properties of equilibrated interfaces and foams. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 344, 79-85.
- Ponce, J., Macías, E. R., Soltero, A. J. F., Fernández, V., Zúñiga, V., Escalona, H. (2008). Physical-Chemical and non-linear rheological properties of aqueous solutions of agave fructans. *e-Gnosis*, 6, 1-23
- Radford, S. J., Dickinson, E. (2004). Depletion flocculation of caseinate-stabilised emulsions: what is the optimum size of the non-adsorbed protein nano-particles? *Colloids and surfaces*, 238, 71-84.
- Rodríguez-Patino, J. M., Pilosof, A. M. R. (2011). Protein-polysaccharide interactions at fluid interfaces. *Food Hydrocolloids*, 25, 1925-1937.
- Ruttarattanamongkol, K., Nor-Afizah, M., Rizvi, S. H. (2015). Stability and rheological properties of corn oil and butter oil emulsions stabilized with texturized whey proteins by supercritical fluid extrusion. *Journal of Food Engineering*, 166, 139-147.

- Sosa-Herrera, M. G., Martínez-Padilla, L. P., Delgado-Reyes, V. A., Torres-Robledo, A. (2016). Effect of agave fructans on bulk and surface properties of sodium caseinate in aqueous media. *Food Hydrocolloids*, 60, 199-205.
- Steffe, J. F. (1992). *Rheological methods in food process engineering*. 2<sup>a</sup> Ed. Freeman Press. Michigan, E. U. A
- Tolstoguzov, V. B. (1998). Functional properties of protein-polysaccharide mixtures. En: S. E. Hill, D. A. Leward, J. R. Mitchel. (Ed.), *Functional Properties of Food Macromolecules* (pp. 252-272) Gran Bretaña, Aspen Publishers.
- Ulloa, J.A., Espinosa-Andrews, H., Cruz-Rodríguez, G. K., Rosas-Ulloa, P., Ulloa-Rangel, B. E., Ramírez-Ramírez, J. C. (2010). Los fructanos y su papel en la promoción de la salud. *Fuente*, 5, 57-62.
- Zhao, Q., Long, Z., Kong, J., Liu, T., Sun-Waterhouse, D., Zhao, M., (2014). Sodium caseinate/flaxseed gum interactions at oil-water interface: effect on protein adsorption and functions in oil-in-water emulsion. *Food Hydrocolloids*, 43, 137-145.
- Zhao, Q., Long, Z., Kong, J., Liu, T., Sun-Waterhouse, D., Zhao, M., (2012). Influence of xanthan gum on physical characteristics of sodium caseinate solutions and emulsions. *Food Hydrocolloids*, 32, 123-129.