



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTILÁN**

**EFFECTO DEL CONCENTRADO DE SUERO DE LECHE  
Y GOMA XANTANA SOBRE LA ESTABILIDAD DE  
ESPUMAS LÁCTEAS**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERA EN ALIMENTOS**

PRESENTA:  
**REBECA DANIELA NAVARRO MARTÍNEZ**

ASESORAS:  
**I.A. VERÓNICA ROMERO ARREOLA  
DRA. LAURA PATRICIA MARTÍNEZ PADILLA**

**CUAUTILÁN IZCALLI, EDO. DE MÉX.**

**2013**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.



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

U. N. A. M.

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

**DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO  
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**



**ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ  
Jefa del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán**

Con base en el Art. 28 del Reglamento de Exámenes Profesionales nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **TESIS:**

**Efecto del concentrado de suero de leche y goma xantana sobre la estabilidad de espumas lácteas**

Que presenta la pasante: **Rebeca Daniela Navarro Martínez**  
Con número de cuenta: **408063366** para obtener el Título de: **Ingeniera en Alimentos**

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

**ATENTAMENTE**  
**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”**  
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 17 de Octubre de 2012.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

|                     | <b>NOMBRE</b>                       | <b>FIRMA</b> |
|---------------------|-------------------------------------|--------------|
| <b>PRESIDENTE</b>   | Dr. Juan Manuel Aceves Hernández    |              |
| <b>VOCAL</b>        | IBQ. Norma Beatriz Casas Alencaster |              |
| <b>SECRETARIO</b>   | IA. Verónica Romero Arreola         |              |
| <b>1er SUPLENTE</b> | Dra. Carolina Moreno Ramos          |              |
| <b>2do SUPLENTE</b> | Dra. María Guadalupe Sosa Herrera   |              |

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 120).  
HHA/pm

**A Dios.**

*Por haberme permitido lograr mis objetivos en compañía de mis seres queridos.*

**A mi mamá Patricia Martínez Pérez**

*Por dedicarse siempre a hacernos mejores personas, por sus desvelos y su motivación constante, que me ha permitido llegar hasta aquí; pero más que nada, por su amor.*

**A mi papá Héctor Navarro Caballero**

*Por sus palabras de fuerza que me alentaron en los momentos difíciles, por su ejemplo de valor para seguir adelante, y por su amor.*

**A mi hermana Judith**

*Por el ejemplo de perseverancia que me ha dado siempre, por su cariño y sus porras en los momentos difíciles.*

**A mis familiares**

*A mi abuela y mis tías Martínez, que me apoyaron a mí y a mi familia en todo momento; a mis tías Navarro y mi tío Guillermo, por preocuparse siempre por mí y mi futuro.*

**A mis asesoras**

*A la I.A. Verónica Romero Arreola y a la Dra. Laura Patricia Martínez Padilla, por su tiempo, su gran apoyo y motivación para la culminación de esta tesis.*

### ***A mis amigos***

*Por alentarme en los momentos difíciles, por esos abrazos y esos momentos de relajación, porque nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y porque, hasta ahora, seguimos siendo amigos.*

### ***A los maestros***

*Aquellos que marcaron cada etapa de mi camino universitario y que me ayudaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración de la tesis.*

*Finalmente a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.*

*¡Gracias!*

# ÍNDICE

|  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| <b>Resumen</b>                                       | 1             |
| <b>Introducción</b>                                  | 3             |
| <br>   |               |
| <b>Capítulo I. Antecedentes</b>                      | 5             |
| 1.1 Espumas  | 5             |
| 1.1.1 Estructura                                     | 5             |
| 1.1.2 Formación                                      | 6             |
| 1.1.3 Fenómenos de desestabilización                 | 10            |
| 1.1.4 Estabilidad de las espumas                     | 13            |
| 1.2. Proteínas                                       | 14            |
| 1.2.1 Organización estructural                       | 14            |
| 1.2.2 Propiedades funcionales de las proteínas       | 16            |
| 1.2.3 Interacción de proteínas con otros componentes | 20            |
| 1.3 Espumas lácteas                                  | 21            |
| 1.3.1 Leche descremada                               | 22            |
| 1.3.2 Proteínas lácteas                              | 23            |
| 1.3.3 La grasa de la leche                           | 29            |
| 1.4 Polisacáridos                                    | 29            |
| 1.4.1 Organización estructural                       | 30            |
| 1.4.2 Propiedades funcionales de los polisacáridos   | 30            |
| 1.4.3 Interacción con proteínas                      | 31            |
| 1.4.4 Goma xantana                                   | 33            |
| <br>   |               |
| <b>Capítulo II. Metodología experimental</b>         | 37            |
| 2.1 Objetivos  | 37            |
| 2.1.1 Objetivo general                               | 37            |
| 2.1.2 Objetivos particulares                         | 37            |
| 2.2 Diseño experimental                              | 37            |
| 2.3 Materiales                                       | 39            |
| 2.4 Actividad preliminar                             | 39            |
| 2.4.1 Determinación del tiempo y velocidad de batido | 39            |
| 2.5 Métodos  | 41            |
| 2.5.1 Preparación de fase continua                   | 41            |
| 2.5.2 Propiedades de la fase continua                | 41            |

|  |            |
|--|------------|
| Densidad   | 41         |
| pH   | 43         |
| Tamaño de partícula                                | 44         |
| Propiedades de flujo                               | 45         |
| 2.5.3 Preparación de espumas                       | 48         |
| 2.5.4 Propiedades de la espuma                     | 48         |
| Rendimiento  | 48         |
| Diámetro de burbuja                                | 49         |
| Drenado en copas de estabilidad                    | 50         |
| Estabilidad por dispersión de luz                  | 52         |
| 2.5.5 Tensión superficial y módulos dilatacionales | 53         |
| 2.6 Análisis estadístico                           | 57         |
| <b>Capítulo III. Resultados y análisis</b>         | <b>59</b>  |
| 3.1 Determinación del tiempo y velocidad de batido | 59         |
| 3.2 Propiedades de la fase continua                | 60         |
| Densidad   | 60         |
| pH   | 63         |
| Tamaño de partícula                                | 66         |
| Propiedades de flujo                               | 72         |
| 3.3 Propiedades de la espuma                       | 84         |
| Rendimiento  | 84         |
| Diámetro de burbuja                                | 87         |
| Drenado en copas de estabilidad                    | 92         |
| Estabilidad por dispersión de luz                  | 97         |
| 3.4 Tensión superficial y reología dilatacional    | 108        |
| <b>Conclusiones</b>                                | <b>113</b> |
| <b>Referencias citadas</b>                         | <b>115</b> |

# ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

## CUADROS

|   | Página |
|---|--------|
| Capítulo 1. Antecedentes  |        |
| Cuadro 1.1 Fuerzas de unión en las interacciones de las proteínas.  | 20     |
| Cuadro 1.2 Composición de leche descremada con máximo 0.3% de grasa.  | 22     |
| Cuadro 1.3 Especificaciones de leche en polvo o deshidratada y concentrada.   | 22     |
| Cuadro 1.4 Clasificación de las proteínas lácteas.  | 23     |
| Cuadro 1.5 Punto isoelectrico y peso molecular de las caseínas.   | 25     |
| Cuadro 1.6 Punto isoelectrico y peso molecular de las proteínas del suero de la leche.  | 28     |
| Capítulo 2. Metodología   |        |
| Cuadro 2.1 Niveles utilizados por cada variable independiente.  | 38     |
| Cuadro 2.2 Matriz experimental del diseño experimental.   | 38     |
| Cuadro 2.3 Condiciones para determinar el porcentaje de humedad.  | 39     |
| Cuadro 2.4 Modelos reológicos.  | 48     |
| Capítulo 3. Resultados y análisis   |        |
| Cuadro 3.1 Rendimiento de la espuma que contiene 10% de leche descremada en polvo, 0.05 % de goma xantana y 10% de concentrado de suero de leche a distintas velocidades y tiempos de batido. | 59     |
| Cuadro 3.2 Densidad relativa de la fase continua de cada corrida del diseño experimental.   | 61     |
| Cuadro 3.3 pH de la fase continua de cada corrida del diseño experimental.  | 63     |
| Cuadro 3.4 Punto isoelectrico y carga neta de las proteínas de la fase acuosa.  | 64     |
| Cuadro 3.5 Diámetro medio de cada una de las corridas experimentales sin aplicar ultrasonido.   | 67     |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Cuadro 3.6  | Diámetro medio de cada una de las corridas experimentales, aplicando ultrasonido.  | 70  |
| Cuadro 3.7  | Viscosidad inicial ( $\eta_0$ ) del modelo de Carreau de las fases acuosas con 0.05% de goma xantana.  | 78  |
| Cuadro 3.8  | Tiempo característico ( $t_c$ ) del modelo de Carreau de las fases acuosas con 0.05% de goma xantana.  | 78  |
| Cuadro 3.9  | Exponente de Carreau ( $p$ ) e índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) de las fases acuosas con 0.05% de goma xantana.   | 79  |
| Cuadro 3.10 | Índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) de la fase acuosa de cada corrida del diseño experimental.   | 81  |
| Cuadro 3.11 | Índice de consistencia $K$ ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ) de la fase acuosa de cada corrida del diseño experimental.   | 83  |
| Cuadro 3.12 | Rendimiento de las espumas formadas con fase acuosa láctea con cada una de las concentraciones de goma xantana y concentrado de suero de leche.                  | 85  |
| Cuadro 3.13 | Diámetro de burbuja ( $\mu\text{m}$ ) de espumas formadas con fases acuosas con cada una de las concentraciones de goma xantana y concentrado de suero de leche. | 88  |
| Cuadro 3.14 | Porcentaje de cambio entre los tamaños de burbuja inmediatamente después del batido y transcurrida una hora.   | 90  |
| Cuadro 3.15 | Velocidad de drenado ( $\text{ml}/\text{min}$ ) para las espuma elaborada con las diferentes concentraciones de goma xantana con concentrado de suero de leche.  | 94  |
| Cuadro 3.16 | Tiempo de inicio de drenado ( $\text{min}$ ) para las espuma elaborada con las diferentes concentraciones de goma xantana con concentrado de suero de leche.     | 96  |
| Cuadro 3.17 | Velocidad de drenado proporcionado por la cinética de desestabilización para cada uno de los experimentos.   | 99  |
| Cuadro 3.18 | Tiempo de inicio de drenado, registrado por la cinética de desestabilización para cada uno de las espumas lácteas.   | 102 |
| Cuadro 3.19 | Velocidad de aumento de tamaño de burbuja proporcionado por la cinética de desestabilización para cada uno de los experimentos.                                  | 104 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Cuadro 3.20 | Tiempo de inicio de aumento de tamaño de burbuja registrado por la cinética de desestabilización para cada uno de los experimentos. . | 106 |
| Cuadro 3.21 | Tensión superficial inicial y transcurridos 11 000 segundos para tres diferentes fases continuas.                                     | 111 |

## FIGURAS

|                          | Página  |
|--------------------------|---|
| Capítulo 1. Antecedentes |   |
| Figura 1.1               | Estructura de las espumas. 5  |
| Figura 1.2               | Tensión superficial. 7  |
| Figura 1.3               | Esquema de la gota colgante. 9  |
| Figura 1.4               | Segregación de las burbujas y drenaje del líquido en la espuma. 10                    |
| Figura 1.5               | Succión capilar del líquido del centro de la película hasta los bordes de Plateau. 11 |
| Figura 1.6               | Efecto de Gibbs-Marangoni. 12   |
| Figura 1.7               | Maduración de Ostwald. 13   |
| Figura 1.8               | Estructura de las proteínas. 15   |
| Figura 1.9               | Carga de las proteínas según el pH. 19  |
| Figura 1.10              | Modelo de la estructura de una micela de caseína. 25                                  |
| Figura 1.11              | Comportamiento de las mezclas proteína-polisacárido. 32                               |
| Figura 1.12              | Estructura molecular de goma xantana. 33  |
| Figura 1.13              | Modelo de Carreau 35  |
| Capítulo 2. Metodología  |   |
| Figura 2.1               | Batidora planetaria. 40   |
| Figura 2.2               | Densímetro DMA 38. 42   |
| Figura 2.3               | pHTestr 3. 43   |
| Figura 2.4               | Granulómetro de rayo laser (CILAS 1180 LD). 44  |
| Figura 2.5               | Curva de valores acumulados hasta el 100% en función 45                               |

|                                       |  |    |
|---------------------------------------|--|----|
|                                       | del diámetro.  |    |
| Figura 2.6                            | Geometría de cilindros concéntricos de doble pared.  | 46 |
| Figura 2.7                            | Tipos de fluidos.  | 47 |
| Figura 2.8                            | Microscopio óptico Olympus CX-31.  | 49 |
| Figura 2.9                            | Hemocitómetro con profundidad de 0.1mm.  | 50 |
| Figura 2.10                           | Copa de estabilidad.   | 51 |
| Figura 2.11                           | Grafico del volumen de líquido drenado con respecto al tiempo.   | 51 |
| Figura 2.12                           | Dispersión y retrodispersión de luz a través de una solución en el tubo de cristal.  | 52 |
| Figura 2.13                           | Curva donde se puede observar el fenómeno de aumento de tamaño de burbuja a través del tiempo en una espuma.   | 53 |
| Figura 2.14                           | Tensiómetro PAT-1 Sinterface   | 54 |
| Figura 2.15                           | Esquema de la gota colgante.   |    |
| Figura 2.16                           | Ejemplo de grafico de tensión superficial (mN/m) en función del tiempo (s).  | 55 |
| Figura 2.17                           | Ejemplo de los gráficos del análisis factorial<br>a) efectos individuales b) interacción.  | 58 |
| <br>Capítulo 3. Resultados y análisis |  |    |
| Figura 3.1                            | Rendimiento medio de la espuma con 10% de leche descremada, 0.05% de goma xantana, 10% de concentrado de suero de leche a dos distintas velocidades durante 10 y 20 minutos. | 60 |
| Figura 3.2                            | Valores medios de la densidad relativa de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción.  | 62 |
| Figura 3.3                            | Valores medios del pH de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción.   | 65 |
| Figura 3.4                            | Distribución de tamaño de partícula característico de la fase acuosa con 10% de leche descremada, concentrado de suero de leche y goma xantana (sin ultrasonido).            | 66 |
| Figura 3.5                            | Valores medios del diámetro de partícula (sin ultrasonido) de los sistemas de estudio a) efectos   | 68 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
|             | individuales b) interacción.   |    |
| Figura 3.6  | Distribución de tamaño de partícula característico de la fase acuosa con 10% de leche descremada, concentrado de suero de leche y goma xantana (con ultrasonido).  | 69 |
| Figura 3.7  | Valores medios del diámetro de partícula (con ultrasonido) de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).   | 71 |
| Figura 3.8  | Curva de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla de la fase acuosa láctea con 10% de leche descremada, 0.05% de goma xantana y 10% de suero de leche (zona A: conformación tridimensional, zona B: zona de viscosidad constante, zona C: zona adelgazante a la cizalla). | 72 |
| Figura 3.9  | Representación de las conformaciones de partículas que se adoptan al aplicar cizalla.  | 73 |
| Figura 3.10 | Curva de flujo para la fase acuosa con 10% de leche descremada, 0.05% de goma xantana y 10% de suero de leche.   | 74 |
| Figura 3.11 | Curvas de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla correspondiente a la curva de descenso, de las fases acuosas 1, 2, 3, 9 (con 10% de leche descremada), goma xantana al 0.05%, leche descremada al 10% y concentrado de suero de leche al 20%.                          | 75 |
| Figura 3.12 | Curvas de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla correspondiente a la curva de descenso, de las fases acuosas 4, 5, 6, 7, 8, 9 (con 10% de leche descremada), goma xantana al 0.15%, goma xantana al 0.05% y leche descremada al 10%.                                   | 76 |
| Figura 3.13 | Ajuste de la curva de flujo de descenso de la fase acuosa 1 (leche descremada 10%, goma xantana 0.05% y suero de leche 10%) al modelo de Carreau.  | 77 |
| Figura 3.14 | Ajuste de la curva de flujo de descenso de la fase acuosa 4 (leche descremada 10%, goma xantana 0.1% y suero de leche 10%) al modelo de la potencia.   | 80 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 3.15 | Valores medios del índice de comportamiento al flujo de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción.   | 82 |
| Figura 3.16 | Valores medios del índice de consistencia de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción.  | 84 |
| Figura 3.17 | Valores medios de rendimiento de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción.  | 86 |
| Figura 3.18 | Valores medios del diámetro de burbuja de los sistemas de estudio inmediatamente después del batido a) efectos individuales b) interacción.   | 89 |
| Figura 3.19 | Foto con el objetivo 10x inmediatamente después del batido (a) y transcurrida una hora (b), de la espuma con 0.05% de goma xantana, 10% de concentrado de suero de leche y 10% de leche descremada.       | 90 |
| Figura 3.20 | Valores medios del porcentaje de aumento de tamaño de burbuja de los sistemas de estudio inmediatamente después del batido a) efectos individuales b) interacción   | 91 |
| Figura 3.21 | Curvas de volumen de líquido drenado con respecto al tiempo para espumas formadas con fases continuas con 0.05% de goma xantana, (10, 15 y 20 %) concentrado de suero de leche y 10% de leche descremada. | 92 |
| Figura 3.22 | Curvas de volumen de líquido drenado con respecto al tiempo para espumas formadas con fases continuas con 0.10% de goma xantana, (10, 15 y 20 %) concentrado de suero de leche y 10% de leche descremada. | 93 |
| Figura 3.23 | Curvas de volumen de líquido drenado con respecto al tiempo para espumas formadas con fases continuas con 0.15% de goma xantana, (10, 15 y 20 %) concentrado de suero de leche y 10% de leche descremada. | 93 |
| Figura 3.24 | Valores medios de la velocidad de drenado de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción.  | 95 |
| Figura 3.25 | Valores medios tiempo inicial de drenado de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción.   | 97 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Figura 3.26 | Ejemplo del perfil de retrodispersión de luz, para la espuma láctea con 10% de leche descremada, goma xantana y concentrado de suero de leche (zona A: drenado, zona B: Aumento de tamaño de burbuja, zona C: disminución de volumen). | 98  |
| Figura 3.27 | Ajuste a modelo lineal de las cinéticas de líquido drenado para cada una de las espumas estudiadas.  | 99  |
| Figura 3.28 | Valores medios de la velocidad de drenado (retrodispersión) de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción.   | 100 |
| Figura 3.29 | Valores medios del tiempo inicial de drenado (retrodispersión) de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción.  | 103 |
| Figura 3.30 | Cinéticas del aumento de tamaño de burbuja, ajustadas a una línea recta, para cada una de las espumas lácteas estudiadas.  | 104 |
| Figura 3.31 | Valores medios de la velocidad de aumento de tamaño de burbuja de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción   | 105 |
| Figura 3.32 | Valores medios del tiempo inicial de aumento de tamaño de burbuja de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción.   | 107 |
| Figura 3.33 | Curvas representativas de tensión superficial en función del tiempo para tres diferentes fases continuas.  | 108 |
| Figura 3.34 | Cinética de adsorción (escala logarítmica) en la interfase aire-agua, de las proteínas de las fases acuosas lácteas estudiadas.  | 109 |
| Figura 3.35 | Etapas del proceso de adsorción dinámico de proteínas en interfaces aire-agua.   | 110 |
| Figura 3.36 | Módulo viscoso dilatacional(s. mN/m) en función de la frecuencia para las fase acuosa lácteas estudiadas a una amplitud de 36.7 %.   | 112 |
| Figura 3.37 | Módulo elástico dilatacional(mN/m) en función de la frecuencia para las fase acuosa lácteas estudiadas a una amplitud de 36.7 %.   | 112 |



## RESUMEN

En el presente trabajo se estudiaron espumas lácteas cuya fase continua está conformada por leche descremada en polvo como base, a una concentración constante (10%), concentrado de proteína de suero de leche para reforzar las propiedades espumantes, en tres diferentes concentraciones (10, 15 y 20%), y como agente estabilizante goma xantana en tres concentraciones (0.05, 0.1 y 0.15%).

Se evaluó la influencia de la goma xantana y del concentrado de suero de leche en las propiedades de la fase continua (densidad, pH, tamaño de partícula y propiedades de flujo) y en las de las espumas obtenidas (rendimiento, tamaño de burbuja, estabilidad por drenado en copas y dispersión de luz). Además se seleccionaron tres fases continuas que proporcionaron distintos niveles de estabilidad a las espumas (mayor, menor e intermedia), a las cuales se evaluó tensión superficial y reología dilatacional.

La densidad de la fase continua se incrementó principalmente al aumentar la concentración de suero de leche, debido a que se agrega mayor cantidad de materia en comparación con la goma xantana. El pH de la fase continua se presentó en un intervalo de 6.2 y 6.8 por lo que la mayoría de las proteínas presentes en la fase continua presentaron carga negativa, lo que evitó que existieran interacciones proteína-polisacárido de tipo electrostático. El tamaño de partícula de la fase continua sin aplicar ultrasonido fue similar tanto al de la leche descremada sola, como al del concentrado de suero de leche solo, los cuales fueron de alrededor de 100  $\mu\text{m}$  y con ultrasonido los diámetros medios disminuyeron a alrededor de 6  $\mu\text{m}$  probablemente debido a la separación de agregados de proteínas. En las propiedades de flujo se observó que el comportamiento reológico de la goma xantana predominó sobre las fases continuas, por lo que se ajustaron a los modelos de Carreau y de la potencia, brindando una viscosidad constante a velocidades de cizalla bajas en los casos con concentración de 0.05% de goma xantana. Se ajustaron todas las curvas de

flujo al modelo de la potencia, a partir de la zona fluidificante a la cizalla, determinando los valores de índice de comportamiento al flujo, así como de índice de consistencia. El análisis estadístico señaló que hubo diferencia significativa en el índice de comportamiento al flujo, principalmente al modificar la concentración de goma xantana, al igual que para el índice de consistencia, el cual resultó mayor en las concentraciones de 0.15% de goma xantana y 20% de concentrado de suero de leche.

Al evaluar las espumas se determinó que el mayor rendimiento lo proporcionó la fase continua con 0.1% de goma xantana y 20% de concentrado de suero de leche, y no con la concentración más alta de goma xantana. Esto puede ser debido a que, al aumentar la consistencia de la fase continua, disminuye la movilidad de las proteínas, y con ello, el rendimiento. En cuanto a la estabilidad de la espuma, resultó que la espuma más estable fue la elaborada con la fase continua que proporcionó mayor índice de consistencia (0.15% goma xantana y 20% concentrado de suero de leche), lo que comprueba que el incremento de la viscosidad de la fase continua, aumenta significativamente la estabilidad de la espuma formada.

En la reología dilatacional no se observó cambio en el módulo elástico dilatacional de la película, al modificar las concentraciones de la goma xantana y el concentrado de suero de leche.

## INTRODUCCIÓN

Las espumas son dispersiones de burbujas de gas en una fase continua, generalmente líquida (Gutiérrez, 1998), que contiene un agente tensoactivo (o surfactante), la cual se forma mediante la aplicación de una fuerza mecánica o inyección de gas (Fennema, 2000). El tensoactivo se adsorbe con rapidez en la interfase aire-agua y reorganiza su conformación, disminuyendo la tensión superficial entre la lamela y el aire que la rodea, además de formar una película viscoelástica cohesiva (Fains y col., 1997), que permite retener las burbujas de aire dentro de la estructura formada.

Dependiendo de las proporciones de la fase dispersa se pueden obtener espumas viscosas o viscoelásticas, según el tamaño de las burbujas y el espesor de la película interfacial (Badui, 2006). Esta variabilidad se usa frecuentemente para proporcionar productos con textura y apariencia diversos. Por ejemplo, entre los alimentos lácteos existen espumas, como la crema batida, los postres lácteos aireados y los helados. La aceptación de estos productos depende, principalmente, del cuerpo, la suavidad, ligereza y estabilidad de los mismos.

A lo largo de su vida, las espumas sufren diversos cambios, entre los que se encuentran: el adelgazamiento de la película interfacial, difusión de gas, rompimiento de la película (o coalescencia), así como la succión capilar y drenado de la fase líquida (Schramm, 2005). Estos fenómenos ocurren, en gran medida, por las propiedades de la fase continua y de la película que se forma, las cuales están influenciadas por la composición y la distribución de los ingredientes entre el gas-líquido (Stanley y col., 1996). Uno de los componentes principales de las espumas lácteas son las proteínas (siendo una de las más usadas en la industria, el suero de leche) que desempeñan el papel de agente espumante, contribuyendo inicialmente en la formación de la espuma y, posteriormente, brindando cierta elasticidad superficial a la lamela (Narchi y col., 2009), lo que evita o retarda el adelgazamiento, o rompimiento de la película alrededor de las burbujas de aire, así como la difusión de

aire a través de la misma (maduración de Ostwald). En un estudio previo, se realizó una investigación acerca de las propiedades espumantes de la leche descremada reforzadas con caseinato de sodio y concentrado de suero de leche, resultando que el suero de leche proporcionó mayor estabilidad que el caseinato de sodio, ya que las velocidades de drenado fueron menores (García, 2010). Sin embargo, la baja viscosidad del medio puede afectar la estabilidad de la espuma, ya que se produce drenado debido a la diferencia de densidades entre las fases y a la segregación de burbujas (Salager y col., 1999), por lo que es necesario aumentar la viscosidad de la fase continua con polisacáridos empleados en la industria alimentaria por sus propiedades espesantes y gelificantes (Dickinson y McClements, 1995). La goma xantana es un polisacárido con un efecto espesante a bajas concentraciones, con características no tixotrópicas, por lo que tras un cizallamiento intenso, la viscosidad inicial se recupera instantáneamente, resultando útil en la estabilización de espumas y emulsiones (Cubero y col., 2002). En esta investigación se estudió el efecto sobre las propiedades espumantes de las proteínas de la leche al reforzarlas con concentrado de suero lácteo, así como el efecto del concentrado de suero de leche y de la goma xantana sobre la estabilidad de las espumas.

# CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

## 1.1 Espumas

Las espumas son dispersiones coloidales, en las que las burbujas de gas conforman la fase dispersa, éstas se encuentran suspendidas en una fase líquida o fase continua. El aire actúa como el fluido “hidrófobo” (sustancia no miscible en agua) disperso en un fluido que generalmente es agua, en la cual se encuentra un agente tensoactivo. El tensoactivo requiere cierta hidrofobicidad que permita que las moléculas emigren a la interfase y se retengan allí para darle mayor rigidez y estabilidad (Schramm, 2005; Fennema, 2000).

Dependiendo de las proporciones de la fase dispersa, se puede obtener una amplia gama de espumas con texturas únicas; bajos volúmenes de aire proporcionan fluidos viscosos, y volúmenes de aire altos generan materiales viscoelásticos, los cuales están asociados con muchos alimentos, como pasteles, pan, helados, productos de confitería, entre otros (Pernell y col., 2000).

### 1.1.1 Estructura

La fase líquida que rodea a las burbujas de gas, o aire, forma una barrera o pared líquida que separa las burbujas y sirve como estructura básica, la cual recibe el nombre de lamela o película. En la lamela usualmente se encuentran los agentes tensoactivos, así como estabilizantes.

En la Figura 1.1 se muestra la estructura de una espuma. Las burbujas que conforman a la fase dispersa, en su mayoría, tienen formas poliédricas y tienen usualmente diámetros entre 10  $\mu\text{m}$  y 1000  $\mu\text{m}$  (Schramm, 2005).

Las burbujas en una espuma se organizan en poliedros a lo largo del borde de la lamela, tres lamelas se unen en ángulos de  $120^\circ$  (llamado el ángulo de Steiner), la

frontera donde se encuentran se denomina borde de Plateau, el cual se muestra en la Figura 1.1. En los bordes de Plateau la presión es diferente que en el resto de la lamela promoviendo fenómenos que desestabilizan a la espuma los cuales se explican más adelante.

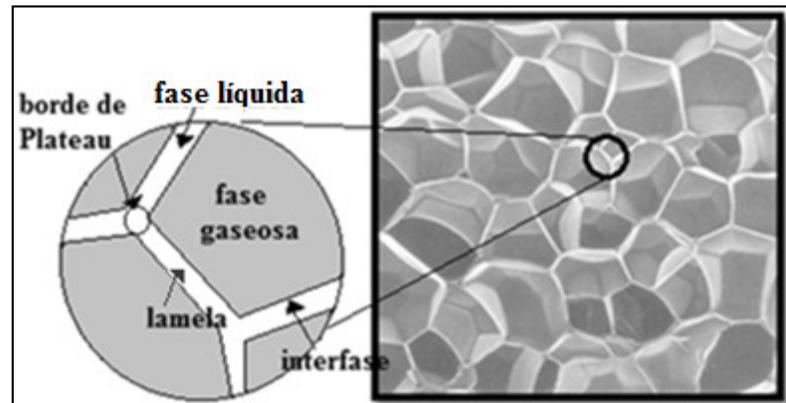


Figura 1.1. Estructura de las espumas (Schramm, 2005).

Según el tamaño de las burbujas y el espesor de la lamela o película, una espuma tendrá casi la consistencia de la fase dispersante o será tan ligera como la fase gaseosa dispersa. El tamaño de las lamelas en espumas estables está en el intervalo de 0.2 a 1  $\mu\text{m}$ . Las lamelas que presentan rigidez y elasticidad superficial adecuada tienden a no fracturarse entre sí (Badui, 2006).

### 1.1.2 Formación de una espuma

Para la formación de una espuma es necesario generar la lamela alrededor de las burbujas de gas, la cual se puede formar mediante tres métodos (Fennema, 2000):

i. Sobresaturación: Un gas usualmente  $\text{CO}_2$  es previamente disuelto en un líquido a alta presión. Posteriormente, se libera por un cambio físico, por lo general por un descenso de la presión o un aumento de la temperatura, el aire se expande y, generalmente, una gran parte de éste escapa (Fennema, 2000).

ii. Fuerzas mecánicas: Se usa una agitación violenta. Una vez que el aire se incorpora, la constante agitación rompe las burbujas presentes, en burbujas de tamaño más pequeño, lo que genera una mayor área superficial, con una fracción volumen de gas que se incrementa a medida que la agitación continúa (Vega, 2006).

iii. Inyección: La fase continua se mezcla con un gas el cual es soplado mediante un burbujeo, en este método también es necesaria una agitación para romper las burbujas en más pequeñas, como en el método anterior (Fennema, 2000).

En las espumas, la superficie del líquido se aumenta en oposición a las fuerzas de la tensión superficial. La tensión superficial es la fuerza neta que actúa sobre las moléculas de la capa en la interfase debida a las fuerzas de van der Waals, las moléculas de la superficie no tienen otras iguales sobre todos sus lados, y por lo tanto, se cohesionan fuertemente con aquellas que se encuentran más cercanas a las mismas (Figura 1.2). Esta atracción hacia adentro sobre las moléculas superficiales o interfaciales hace que la superficie o interfase se contraiga y se resista a estirarse o romperse, lo cual produce una disminución en el área superficial (Nave, 2010; Wilson y Buffa, 2003).

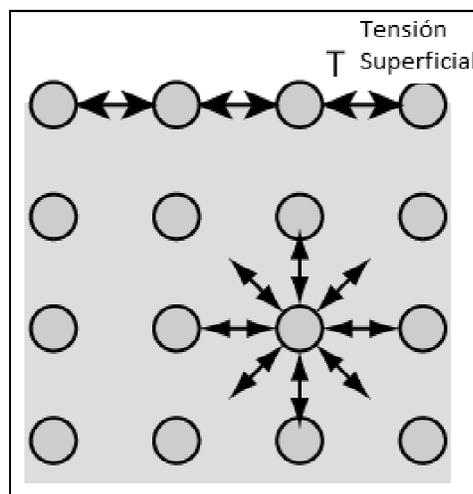


Figura 1.2. Tensión superficial (Nave, 2010).

Por lo tanto, la tensión superficial vuelve a este sistema inestable, por lo que necesita la presencia de un agente surfactante, el cual disminuye la tensión superficial entre la lamela y el aire que la rodea, entre más se disminuye la tensión superficial, más fácil se crea un área superficial o interfacial (Fains y col., 1997).

Un agente surfactante es una sustancia que une las superficies de dos sustancias inmiscibles, para lo cual es necesario que tenga afinidad tanto con el agua como con el aire, es decir, que tenga una parte hidrófila que se oriente hacia la fase continua y una parte hidrófoba que se oriente hacia el gas. Así, un surfactante modifica las fuerzas de la interfase al orientar su parte hidrófila hacia la fase continua y su parte hidrófoba hacia el gas, proporcionando una unión más estrecha. El surfactante se adsorbe con rapidez en la interfase aire-agua durante la formación de burbujas y reorganiza su conformación, formando una película viscoelástica cohesiva y disminuyendo así la tensión superficial. A este fenómeno se le denomina tensoactividad o actividad superficial (Fains y col., 1997).

La concentración de los componentes tensoactivos será siempre superior en la interfase o en la superficie que en el resto de la solución. Muchos componentes naturales de los alimentos muestran propiedades tensoactivas, por ejemplo alcoholes, ácidos grasos, fosfolípidos, algunos polisacáridos, proteínas, entre otros. Los surfactantes pueden clasificarse como aniónicos, catiónicos o no iónicos, según la carga eléctrica que manifieste la parte tensoactiva de la molécula (Lewis, 1993).

Existen distintos métodos para medir la tensión superficial, entre ellos el método de la gota colgante, el cual está basado en la ecuación de Young-Laplace, la cual relaciona el perfil de una gota colgante con la tensión superficial. Este método permite la determinación de la tensión superficial a partir del cálculo de diversos factores de forma o parámetros geométricos que caracterizan el perfil de una gota: diámetro máximo o ecuatorial de la gota ( $DE$ ), diámetro de cuello ( $DS$ ), y radio de curvatura en el ápice de la misma ( $R_0$ ) los cuales se esquematizan en la Figura 1.3. La ecuación de Young-Laplace es una relación matemática que combina el cambio

de presión en la interfase que hay entre dos líquidos inmiscibles o entre una fase gaseosa y otra líquida, con los cambios dentro del seno de cada uno de los fluidos (Fuentes y López de Ramos, 2001).

En ciertos casos, la adición de algunos componentes al agua incrementa su tensión superficial. Esto se conoce como adsorción negativa. Aquí, las fuerzas de atracción soluto- superficie son mayores que las fuerzas de atracción disolvente-disolvente, y las moléculas del soluto tienden a emigrar desde la superficie hasta el interior del líquido. Tales compuestos se denominan tensoinactivos, son ejemplos el cloruro sódico y la sacarosa (Lewis, 1993).

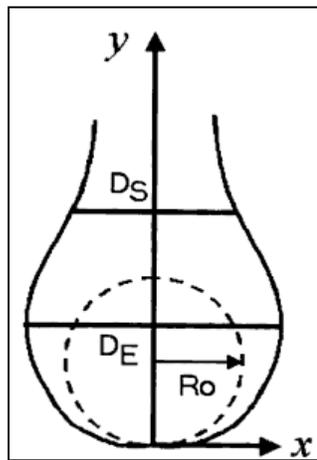


Figura 1.3. Esquema de la gota colgante (Fuentes y López de Ramos, 2001).

Otra propiedad importante es la capacidad espumante de los surfactantes, que se refiere a la cantidad de área en la interfase que puede ser creada por el agente, se puede expresar en diversas formas, como rendimiento o poder espumante (Badui, 2006).

El poder espumante generalmente aumenta con la concentración del surfactante hasta un valor máximo, lo que se ve afectado por el método que se utilice para formar la espuma, posteriormente. Posteriormente, al llegar a una concentración crítica, el poder espumante ya no se incrementa (Badui, 2006).

### 1.1.3 Fenómenos de desestabilización de las espumas

A lo largo de su vida las espumas sufren de diversos cambios y fenómenos. Principalmente: a) drenado de líquido y segregación de burbujas, b) adelgazamiento de la lamela, c) difusión de gas (maduración de Ostwald) y d) coalescencia (rompimiento de la lamela) (Schramm, 2005).

#### *a) Drenado de la fase continua y segregación de burbujas*

El drenado del líquido se debe a la gravedad, es decir, a la diferencia de densidades entre la fase continua y la fase dispersa, la primera desciende como se esquematiza en la Figura 1.4 (b). La Figura 1.4 (a) muestra cómo el drenado viene acompañado de la segregación de las burbujas que ocurre debido a la fuerza de Arquímedes, es decir, que las burbujas de mayor diámetro tienden a elevarse sobre las pequeñas.

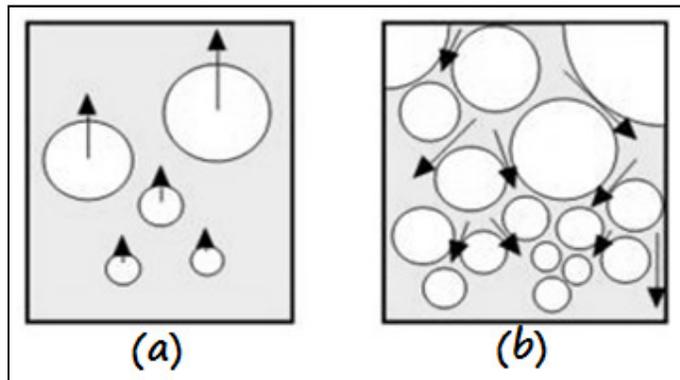


Figura 1.4. a) Segregación de las burbujas, b) drenaje del líquido en la espuma (Salager y col., 1999).

Por otro lado, la succión capilar desde los bordes de Plateau promueve el drenado, el cual es un proceso fisicoquímico hidrodinámico que es gobernado por factores simultáneos como: a) espesor de la película (espesor crítico 5-10 nm) (Rodríguez, 2008); b) la tensión superficial, ya que si ésta es cercana al valor del agua pura, tiende a aumentar el drenado, y c) el radio y la curvatura de los bordes de Plateau (la cual influye directamente sobre el gradiente de presión que existe entre las burbujas) (Indrawati y col., 2008; Narsimhan, 1990).

En la Figura 1.5 se representa cómo la presión en las uniones de más de dos burbujas, es más baja que en otros puntos en la fase continua, debido a la superficie de la curva, este gradiente de presión es la fuerza motriz que desplaza el líquido del centro de las películas hacia los bordes de Plateau y, posteriormente, ocurre el drenado del mismo.

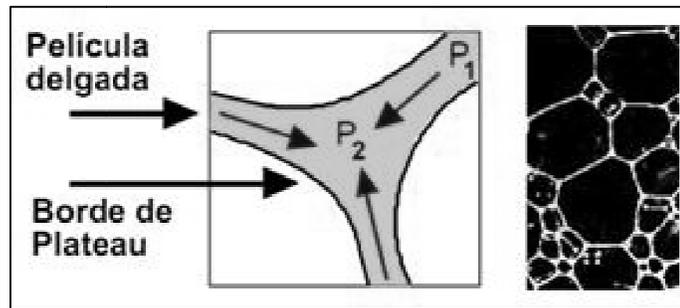


Figura 1.5. Succión capilar del líquido del centro de la película hasta los bordes de Plateau (Salager y col., 1999).

#### *b) Adelgazamiento de la película*

En el adelgazamiento de la película, dos o más burbujas se aglomeran, por lo que la lamela se somete a un estiramiento, este estiramiento es frecuentemente complejo, y el área superficial gas-líquido aumenta rápidamente. El estiramiento de la lamela brinda una diferencia de presión entre la zona estirada de la película y las zonas adyacentes como se observa en la Figura 1.6. Esto produce un fenómeno llamado inestabilidad de Gibbs-Marangoni (Salager y col., 1999).

Las soluciones con surfactantes muestran un comportamiento dinámico de la tensión superficial. Es decir, es necesario cierto tiempo para alcanzar la tensión superficial en el equilibrio. En el equilibrio la elasticidad superficial se define por la ecuación de Gibbs. Si el área superficial de la solución de pronto aumenta o disminuye, la capa de surfactante adsorbido en la interfase entonces requerirá algún tiempo para recuperar su concentración en la superficie de la fase continua. Mientras tanto, la capa originalmente adsorbida con surfactantes se amplía o reduce, por lo que la

interfase tiene regiones en las que la tensión superficial cambia. La existencia de un gradiente de tensión superficial en la superficie crea una fuerza de resistencia para oponerse a una mayor expansión o contracción, también hace que el líquido fluya a la región de menor tensión superficial. Este caso lo define la elasticidad superficial de Marangoni (Schramm y Green, 1995).

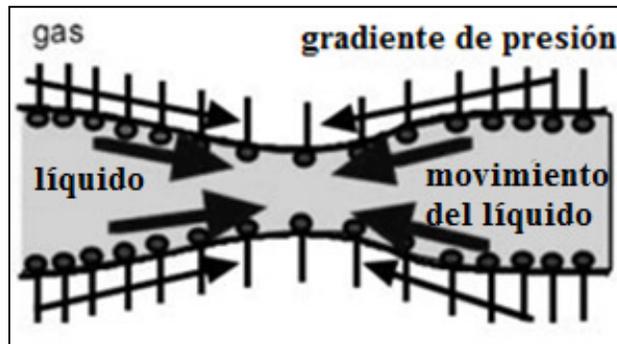


Figura 1.6. Efecto de Gibbs-Marangoni (Pernell y col., 2000).

*c) Difusión de gas (maduración de Ostwald)*

La diferencia de tamaño de las burbujas provoca un gradiente de presión entre las mismas, esto promueve la difusión de gas entre ellas. Según la ley de Laplace, la presión es mayor en las burbujas pequeñas que en las burbujas grandes, lo que ocasiona que estas últimas crezcan a expensas de las primeras, como se observa en la Figura 1.7. Este mecanismo sirve para minimizar la energía total, disminuyendo el área interfacial (Schramm, 2005).

Este fenómeno se presenta más rápido en la parte superior de la espuma debido a que la difusión se da con la atmósfera. Para inhibir este efecto se utilizan agentes espumantes con menor tamaño del grupo hidrófilo, ya que producen poros más pequeños por la presencia de una capa adsorbida insoluble (Fennema, 2000; Rodríguez, 2008).

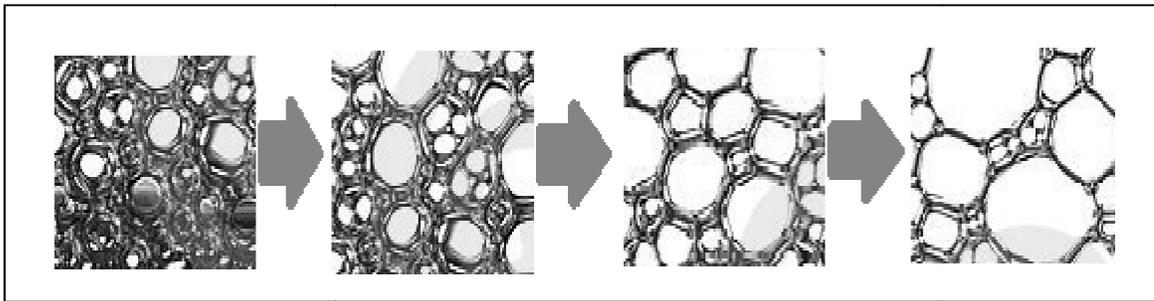


Figura 1.7. Maduración de Ostwald (Schramm, 2005).

*d) Rompimiento de la película (coalescencia)*

El drenado del líquido, el adelgazamiento de la lamela y la difusión de gas debilitan a la película, por lo que el estiramiento o deformación pueden romperla, provocando coalescencia, en la que, dos o más burbujas forman una sola, reduciendo el total del área superficial (Schramm, 2005).

Para evitar la coalescencia, las espumas requieren la capacidad de recuperarse después de una deformación, es decir, para resistir la compresión-expansión. Esta capacidad es conocida como elasticidad superficial. En reología dilatacional se define a la elasticidad superficial o módulo elástico dilatacional,  $E$ , como:

$$E = \frac{d\gamma}{d\ln A}$$

Donde  $\gamma$  es la tensión superficial y  $A$  es el área de la superficie. El módulo elástico dilatacional está relacionado con la compresión de la película superficial (Schramm y Green, 1995).

**1.1.4 Estabilidad de las espumas**

La preservación de las espumas para su manejo es importante, sin embargo, la disminución en la tensión superficial no es suficiente. Algunos factores importantes para evitar los fenómenos de desestabilización mencionados se presentan a continuación (Schramm, 2005):

- Baja tensión superficial: hace fácil la formación de una gran área en la interfase.
- Bajo drenado: disminuye el adelgazamiento de la lamela o película.
- Baja succión capilar: disminuye el adelgazamiento de la lamela.
- Alta elasticidad superficial: contrarresta los cambios provocados por la presión.
- Alta viscoelasticidad de la lamela: previene el rompimiento de la misma.
- Alta viscosidad de la fase continua: disminuye la velocidad de drenado. Una mayor viscosidad de la fase continua promueve menor tamaño de la burbuja, debido a la disminución de las velocidades de coalescencia (Kamath y col., 2008). Además, la gelificación o inmovilización de la fase continua, brinda cierta rigidez a la espuma y minimiza la pérdida de los gases atrapados, por ejemplo, en la elaboración de bombones, helado o pan, las fases continuas son sólidos o semisólidos (Lewis, 1993).

## **1.2 Proteínas**

Las proteínas se han adicionado en la industria de alimentos como agentes surfactantes, ya que juegan un papel muy importante en la estabilización de espumas al sufrir desnaturalización superficial durante su formación (Lewis, 1993).

Las proteínas poseen propiedades nutricionales, ya que de sus componentes se obtienen moléculas nitrogenadas que permiten conservar la estructura y el crecimiento de quien las consume; así mismo, pueden ser ingredientes de productos alimenticios y, por sus propiedades funcionales, ayudan a establecer la estructura y propiedades finales del alimento. Las funciones de cada una de las proteínas dependerán de sus propiedades fisicoquímicas como: carga, hidrofobicidad, estado de agregación, entre otros (Badui, 2006).

### **1.2.1 Organización estructural**

Dentro de las proteínas se pueden encontrar diferentes tipos de enlaces que participan en la estructura: el enlace covalente, las interacciones electrostáticas o

puentes salinos, los puentes de hidrógeno y las fuerzas de Van der Waals, de los cuales depende su estabilidad y, por lo tanto, su funcionalidad (Badui, 2006). Existen cuatro tipos de estructuras de proteínas (Figura 1.8):

i. *Estructura primaria*. Es la secuencia u ordenación de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos, dictada por la secuencia de ADN del gen que la codifica (Peretó y col., 2007).

ii. *Estructura secundaria*. Es el plegamiento que la cadena polipeptídica experimenta gracias al establecimiento de enlaces de hidrógeno entre los átomos de las distintas uniones peptídicas. El plegamiento secundario de la cadena peptídica puede adquirir diversas formas, pero las más importantes son las hélices y las láminas (Teijón, 2006).

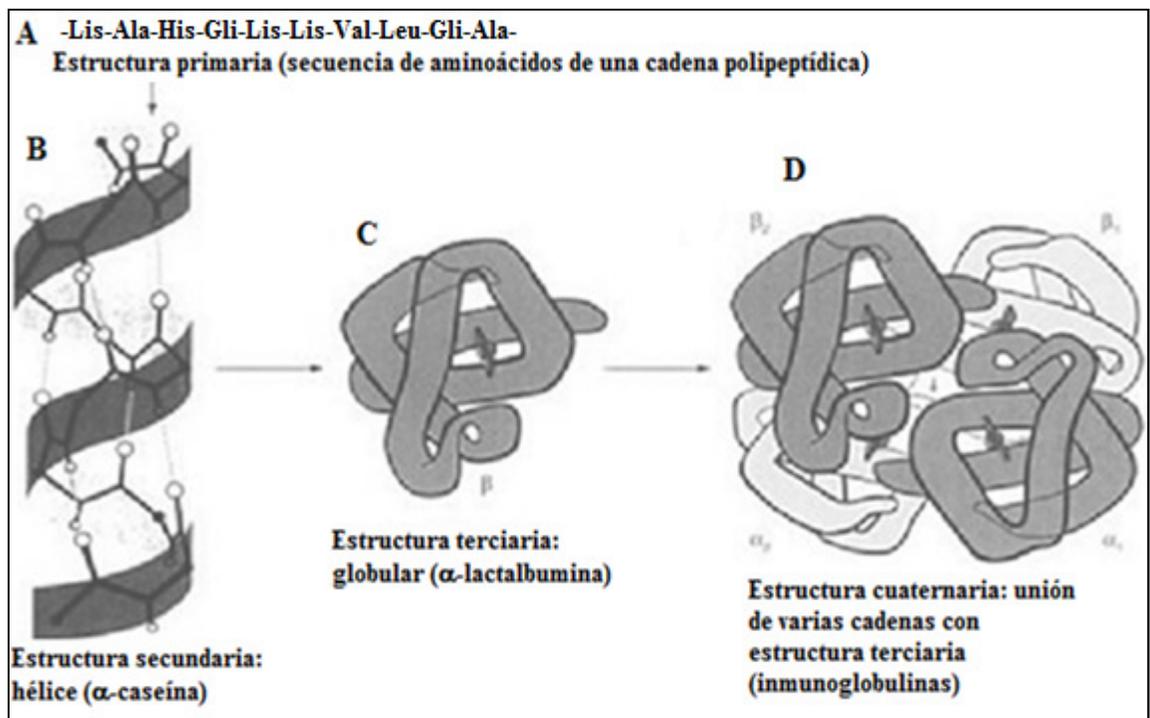


Figura 1.8. Estructura de las proteínas (Voet y Voet, 2006).

iii. *Estructura terciaria*: La cadena peptídica presenta un plegamiento tridimensional que adopta una forma globular. Esta conformación globular facilita la

solubilidad en agua para realizar funciones de transporte, enzimáticas, hormonales, entre otras. Se mantiene estable gracias a la existencia de enlaces entre los radicales orgánicos (R-) de los aminoácidos que pueden ser (Teijón, 2006):

- 1.-Puentes di-sulfuro entre los radicales de aminoácidos que tienen azufre.
- 2.- Puentes de hidrógeno.
- 3.- Puentes electrostáticos.
- 4.- Interacciones hidrófobas.

iv. *Estructura cuaternaria*: Cuando una proteína consta de más de una cadena polipeptídica, es decir, las proteínas oligoméricas, son definidas por el número de polipéptidos presentes en una proteína y su disposición espacial. A veces está relacionado con la multifuncionalidad. Después de la asociación u oligomerización, de los monómeros, se obtiene la estructura cuaternaria de la proteína en cuestión. Si en la proteína sólo existen dos subunidades, entonces se denomina dímero, y puede ser homodímero o heterodímero, dependiendo de si las cadenas de los monómeros son iguales o diferentes; en general, también pueden denominarse proteínas multiméricas (Battaner, 1993).

### **1.2.2 Propiedades funcionales de las proteínas**

Las propiedades funcionales se definen como “cualquier propiedad fisicoquímica de los polímeros que afecta y modifica algunas características de un alimento y que contribuye a la calidad final del producto” (Badui, 2006). Dependen, además, de factores intrínsecos y de factores extrínsecos del medio que los rodea, los cuales en ocasiones pueden modificarse (pH, fuerza iónica, temperatura, actividad acuosa, constante dieléctrica, entre otros), al promover su desnaturalización. Mientras más desnaturalizadas estén, las proteínas se vuelven menos solubles.

### *Propiedades de hidratación*

Dependen de las interacciones proteína-agua. El agua modifica las propiedades fisicoquímicas de las proteínas. Por ejemplo, al ejercer un efecto plastificante sobre proteínas amorfas o semicristalinas, se modifica su temperatura de transición vítrea y de fusión. Las moléculas de agua se unen a diferentes grupos en las proteínas, como son los grupos cargados mediante interacciones ión-dipolo. La solubilidad se refiere a la manifestación termodinámica del equilibrio entre las interacciones proteína-proteína y solvente-proteína, que a su vez dependen de la hidrofobicidad y naturaleza iónica de las mismas (Fennema, 2000).

### *Propiedades de superficie*

En general, las proteínas pueden adsorberse a una gran variedad de superficies, tanto hidrófobas como hidrófilas. El grado de adsorción depende del peso molecular, del número de cadenas laterales aniónicas y catiónicas. El incremento en la fuerza iónica, generalmente, aumenta la adsorción, protegiendo a las proteínas adyacentes de las interacciones eléctricas de repulsión (Gennaro, 2003).

Las proteínas pueden llevar a cabo la estabilización de espumas y emulsiones, al migrar espontáneamente a la interfase aire-agua, puesto que su energía libre es menor. En la interfase, las proteínas confieren resistencia a la coalescencia de las partículas durante el manejo. Se debe considerar la relación de la estabilidad-flexibilidad de la cadena polipeptídica, la adaptabilidad a los cambios en el medio ambiente, así como los patrones de distribución de los grupos hidrofílicos e hidrofóbicos en la superficie de la proteína (Badui, 2006). Un contenido importante en aminoácidos no polares puede influir positivamente en la actividad superficial y en las interacciones con otros péptidos. Asimismo, las regiones hidrofóbicas de la molécula proteínica influyen de modo directo sobre las propiedades tensoactivas, tales como la capacidad de emulsionar o formar espumas (Bello, 2000).

La formación de espumas con proteínas implica un proceso de desnaturalización controlado, ya que la proteína se tiene que desdoblarse para orientar sus aminoácidos hidrófobos hacia el interior de la burbuja y los hidrófilos hacia el exterior, en contacto con la fase continua. Para ser un buen agente espumante, una proteína debe ser capaz de adsorberse con rapidez en la interfase y formar una película viscoelástica cohesiva (Fains y col., 1997). Este fenómeno es termodinámicamente favorable debido a la deshidratación simultánea de la interfase hidrófoba y a las porciones hidrófobas de las proteínas. En algunos casos, un calentamiento drástico de estos polipéptidos reduce su capacidad de espumado debido a una excesiva desnaturalización (Foegeding y col., 2006).

La mayoría de las proteínas presentan capacidad de espumado en un intervalo de concentración de 2 a 8%. La concentración en la interfase de las proteínas en la espuma es aproximadamente entre 2-3 mg/m<sup>2</sup> (Badui, 2006).

#### *Factores que afectan las propiedades espumantes de las proteínas*

*pH*. Los cambios de *pH* producen la ruptura de la configuración espacial de la proteína. Cuando se rompen los enlaces que mantenían sus estructuras cuaternaria, terciaria y secundaria, conservándose solamente la primaria, la proteína se desnaturaliza, transformándose en filamentos lineales y delgados que se entrelazan hasta formar compuestos fibrosos e insolubles en agua.

Cuando el *pH* es bajo, los grupos ionizables están protonados, y la carga neta de la proteína es de signo positivo. Como se muestra en la Figura 1.9, cuando el *pH* es alto, los grupos ionizables están desprotonados, y la carga neta es de signo negativo. Entre ambas zonas, habrá un *pH* en que la carga neta de la proteína es nula; es el *pH* isoelectrico o punto isoelectrico, y es característico de cada proteína. La solubilidad de una proteína es mínima en su punto isoelectrico, ya que su carga neta es cero y desaparece cualquier fuerza de repulsión electrostática que pudiera dificultar la formación de agregados (González, 2012).

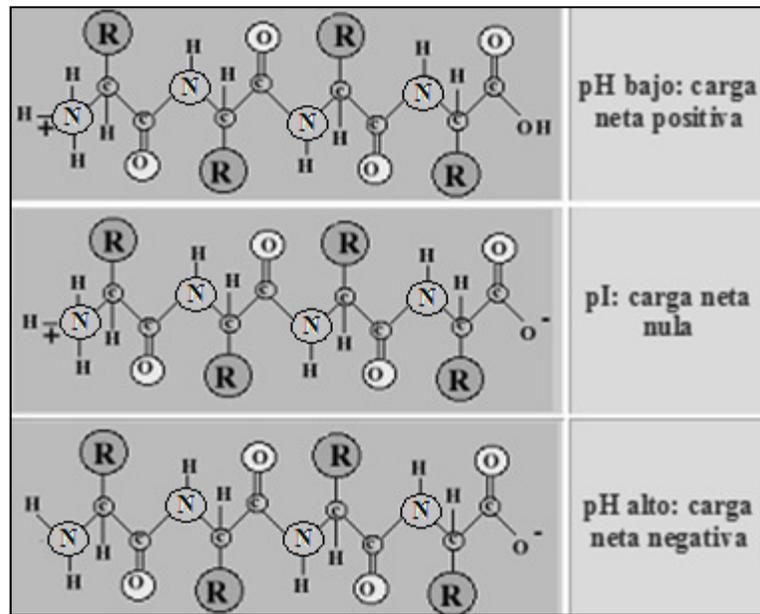


Figura 1.9. Carga de las proteínas, según el pH (González, 2012).

La adsorción puede ser máxima cuando el pH de la solución proteínica es igual al punto isoeléctrico de la molécula; también debido a una reducción de la repulsión eléctrica, por lo que algunas proteínas que estabilizan espumas son más estables en pH isoeléctrico, si no hay insolubilización. La reducida presencia de interacciones de repulsión promueven interacciones favorables entre proteínas y polisacáridos, además de la formación de una película viscoelástica en la interfase, lo que favorece tanto la capacidad de espumado como la estabilidad de la espuma (Genaro, 2003; Badui, 2006).

*Temperatura.* La desnaturalización parcial y controlada de las proteínas favorece las propiedades espumantes; no así al sobrecalentar, ya que la desnaturalización total las vuelve insolubles, lo que impide la adsorción en la interfase (Badui, 2006).

*Polisacáridos.* La adición de polisacáridos puede estabilizar espumas mediante el aumento de la viscosidad de la fase continua, lo cual retarda los fenómenos de drenado y maduración de Ostwald de los componentes dentro de la espuma (Walsh y col., 2008). En el caso de polisacáridos con propiedades tensoactivas, éstos pueden

competir con las proteínas por la interfase o interaccionar para potencializar las propiedades de superficie (Jara, 2011).

*Lípidos.* Las moléculas de grasa compiten con las proteínas en la velocidad de adsorción en la interfase aire/agua, y se acentúa cuando la concentración de grasas es mayor que 0.5%, pues su superficie es más activa que la de las proteínas, lo que trae como consecuencia que la superficie no sea viscoelástica, ocasionando coalescencia (Badui, 2006).

*Otras proteínas.* Cuando proteínas diferentes compiten por sitios de adsorción en una misma superficie, el efecto del peso molecular se hace más notable. En el principio del proceso de adsorción, la proteína de menor peso molecular, se puede difundir más rápidamente a la superficie, ocupando inicialmente la interfase. Después de cierto tiempo, la proteína de mayor peso molecular desplaza a la otra debido a que tiene más puntos de interacción posibles con la superficie, y por lo tanto, una mayor interacción (Gennaro, 2003).

### 1.2.3 Interacción de las proteínas con otros componentes

Las proteínas tienen la capacidad de interactuar con compuestos muy diversos, como el agua, los lípidos, los hidratos de carbono y otros polipéptidos, iguales o diferentes, a través de diversos tipos de uniones (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1. Fuerzas de unión en las interacciones de las proteínas (Badui, 2006).

| Interacción           | Covalente | Iónica* | Puentes de Hidrógeno | Hidrófobas |
|-----------------------|-----------|---------|----------------------|------------|
| Proteína-proteína     | +         | +       | ++                   | +++        |
| Proteína-lípido       | +         | +       | +                    | +++        |
| Proteína-polisacárido | -         | +++     | ++                   | -          |
| Proteína-iones        | -         | +       | +++                  | -          |
| Proteína-disolvente   | -         | +       | +++                  | -          |

- No contribuye; + Contribución parcial; ++ Contribución fuerte; +++ Contribución muy fuerte \*Algunas veces por mediación de cationes polivalentes, como el calcio.

El tipo de fuerza que une a las proteínas con otros componentes define el tipo de interacción que existirá entre ambos componentes. Las interacciones de proteínas con otras moléculas son importantes para establecer las propiedades reológicas y texturales.

### **1.3 Espumas lácteas**

El helado, la crema batida y bebidas espumosas, como el capuchino, son ejemplos de espumas a base de leche en las que las burbujas de aire son, al menos parcialmente, cubiertas y estabilizadas por componentes de la leche. Las espumas lácteas son atractivas debido a su ligereza y textura.

La leche es un sistema coloidal que consta de una fase continua que contiene lactosa, minerales, proteínas solubles (proteínas del suero), vitaminas hidrosolubles y elementos traza. Dispersas en la fase acuosa, se hallan pequeñas gotitas o glóbulos de grasa. La apariencia lechosa característica se debe a la suspensión coloidal de la proteína de la leche (caseína) y al calcio en la solución (Lewis, 1993). La leche de vaca contiene, normalmente, entre 2.5 y 6 % de grasa y de 2.9 a 5% de proteína. El pH de la leche generalmente oscila entre 6.5 y 6.7, estos valores corresponden con una temperatura de 25 °C, aproximadamente. Como tal, la viscosidad dinámica de la leche entera es de  $2.2 \times 10^{-3}$  Pa.s a 20 °C; y bajo condiciones moderadas de cizalla, se comporta como un fluido newtoniano (Bylund y Gómez, 2003; Alais, 1985).

A diferencia de las espumas elaboradas con leche entera, las lamelas de las espumas elaboradas con leche descremada permanecen bien definidas y no presentan líquido en la superficie de la espuma, lo que sugiere que la ruptura de las burbujas no es frecuente y las espumas formadas con leche descremada son más estables que las formadas a partir de leche entera (Kamath, y col., 2008).

### 1.3.1 Leche descremada

La leche descremada es un producto al cual se ha eliminado parte del contenido de grasa propia de la leche; la composición la leche descremada se muestra en el Cuadro 1.2. Para la leche descremada en polvo, la NOM-155-SCFI-2003 establece las especificaciones mostradas en el Cuadro 1.3.

Cuadro 1.2. Composición de leche descremada con máximo 0.3% de grasa (Kraut, 1998).

| <b>Componente</b>   | <b>%</b> |
|---------------------|----------|
| Humedad             | 90.9     |
| Proteína            | 3.5      |
| Grasa               | 0.1      |
| Hidratos de carbono | 4.8      |
| Ácidos orgánicos    | 0.2      |
| Sales minerales     | 0.8      |

Las propiedades físicas de la leche descremada en polvo también se encuentran descritas en la norma referida anteriormente, la cual señala con especificaciones que es un polvo uniforme, sin gránulos de color blanco amarillento, con sabor y olor agradable, que ha sido deshidratado.

Cuadro 1.3. Especificaciones de leche en polvo o deshidratada y concentrada (NOM-155-SCFI-2003).

| <b>Especificaciones</b>                     | <b>Entera</b> | <b>Descremada</b> |
|---|---------------|-------------------|
| Grasa butírica % (m/m)                      | Mínimo 26     | Máximo 1.5        |
| Humedad % m/m                               | Máximo 4      | Máximo 4          |
| Proteínas, sólido lácteos no grasos % (m/m) | Mínimo 34     | Mínimo 34         |
| Caseína, sólidos lácteos no grasos, % (m/m) | Mínimo 23.8   | Mínimo 23.8       |

Las propiedades fisicoquímicas de la leche descremada dependen de la composición, así como de la temperatura; sin embargo pueden presentar un pH entre 6.5 y 6.65. La densidad de la misma es otra propiedad importante, y suele ser de 1036 kg/m<sup>3</sup> a 20 °C. La viscosidad de la leche descremada es de 1.9 mPa.s a 20 °C (Alais, 1985).

### 1.3.2 Proteínas lácteas

Las proteínas lácteas se agrupan en dos grandes categorías: las caseínas (las cuales son insolubles) y las proteínas del suero (que son solubles). En el Cuadro 1.4 se muestra la clasificación y las fracciones que constituyen a cada categoría de las proteínas lácteas.

Cuadro 1.4.- Clasificación de las proteínas lácteas (Bylund y Gómez, 2003).

| <b>Proteína</b>                                      | <b>% de proteína total (p/p)</b> |
|--|----------------------------------|
| <b>Caseína</b>                                       |                                  |
| $\alpha_{s1}$ - caseína                              | 30.6                             |
| $\alpha_{s2}$ - caseína                              | 8.0                              |
| $\beta$ - caseína                                    | 30.8                             |
| $\kappa$ - caseína                                   | 10.1                             |
| <b>Total caseína</b>                                 | <b>79.5</b>                      |
| <b>Seroproteínas</b>                                 |                                  |
| $\beta$ - lactoglobulina                             | 9.8                              |
| $\alpha$ - lactoglobulina                            | 3.7                              |
| Albúmina sérica                                      | 1.2                              |
| Inmunoglobulinas                                     | 2.1                              |
| Otras (incluyendo peptona proteasa)                  | 2.4                              |
| <b>Total seroproteínas</b>                           | <b>19.3</b>                      |
| <b>Proteínas de la membrana del glóbulo de grasa</b> | <b>1.2</b>                       |
| <b>Proteína total</b>                                | <b>100</b>                       |

#### *Caseínas*

Las caseínas son fosfoglicoproteínas; están divididas en tres subgrupos: las  $\alpha$ -caseínas, la  $\kappa$ -caseína y la  $\beta$ -caseína. Los tres subgrupos tienen en común el hecho

de que uno de cada dos aminoácidos que contienen grupos hidroxilo está esterificado con el ácido fosfórico. El ácido fosfórico se une con el calcio y el magnesio, así como con algunas sales complejas, para formar uniones entre moléculas y dentro de las propias moléculas. Las sales de calcio de  $\alpha$ -caseína y  $\beta$ -caseína son casi insolubles en agua, mientras que las de  $\kappa$ -caseína son claramente solubles (Bylund y Gómez, 2003).

Las caseínas forman micelas que pueden medir hasta  $0.4 \mu m$ . Si se estudia la estructura de las micelas, se observa que están constituidas por subunidades micelares o submicelas con un diámetro de 10 a 20  $nm$ , que tienen alrededor de 10 moléculas de los cuatro tipos de caseínas ( $\alpha_{s1}$ ,  $\alpha_{s2}$ ,  $\beta$  y  $\kappa$ ) en proporciones variables, con presencia de calcio en cada grupo fosfato. La unión de las distintas submicelas por fosfato cálcico da lugar a la micela propiamente dicha, cuya representación gráfica se muestra en la Figura 1.10. Dentro de cada submicela, las caseínas  $\alpha$  y  $\beta$ , de carácter insoluble en agua, se sitúan en el centro o núcleo hidrófobo; mientras que las  $\kappa$ -caseínas, de naturaleza hidrófila, se sitúan en la superficie. Debido a esta distribución, la submicela adquiere una forma más o menos esférica y es soluble en forma de coloide. Las uniones de fosfato y citrato de calcio, la presencia de magnesio, así como las interacciones hidrófobas entre las distintas submicelas, son las responsables de su integración en la micela de caseína. Una micela de tamaño medio está formada por entre 400 y 500 submicelas (Hernández, 2010; Bylund y Gómez, 2003).

Las micelas de caseína precipitan a  $pH$  4.6 y  $20^\circ C$ . Las caseínas contienen más aminoácidos hidrófobos (como la prolina) que hidrófilos, y por tanto presentan, dentro de su estructura primaria, zonas con propiedades apolares. Además, contienen regiones cargadas que les permite unirse electrostáticamente (Badui, 2006).

Las caseínas tienen propiedades, como la resistencia a tratamientos térmicos altos sin sufrir alteraciones debido a que son “proteínas desnaturalizadas de origen”. Además, poseen un alto grado de hidrofobicidad, por lo que presentan mejor adsorción en la interfase de espumas. La  $\alpha_{s1}$ - Caseína y la  $\beta$ - Caseína son moléculas flexibles con buena afinidad con la fase dispersa (Romero del Castillo y Mestres, 2004).

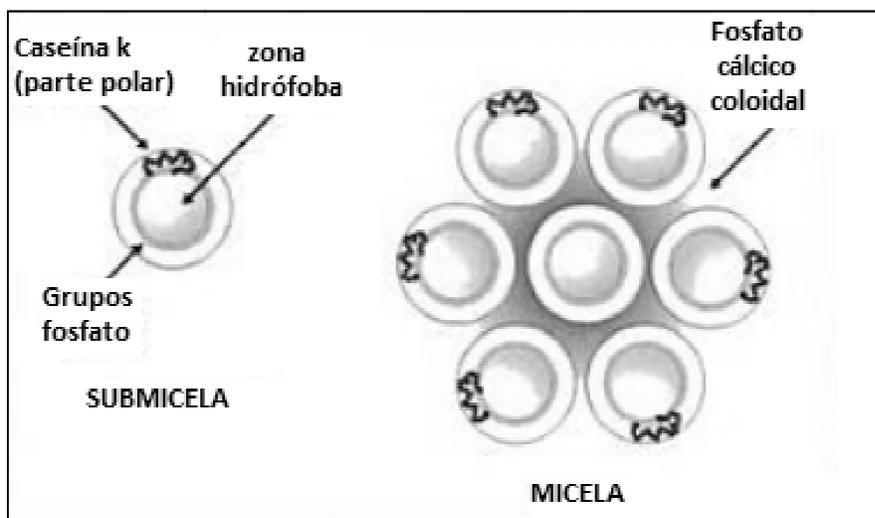


Figura 1.10. Modelo de la estructura de una micela de caseína (Hernández, 2010).

Cuadro 1.5.- Punto isoelectrico y peso molecular de las caseínas (Badui, 2006; Ocampo y col., 2008).

| Proteína                | Punto isoelectrico | Peso molecular aprox (kDa) |
|-------------------------|--------------------|----------------------------|
| $\alpha_{s1}$ - Caseína | 4.44- 4.476        | 27                         |
| $\beta$ - Caseína       | 4.83- 5.07         | 24                         |
| $\kappa$ - Caseína      | 5.45- 5.77         | 8                          |

El punto isoelectrico (Cuadro 1.5) es ácido debido a la presencia de aminoácidos con terminaciones carboxilo (como la treonina). Cuando se llega al punto isoelectrico, se produce la neutralización completa de la carga eléctrica y la pérdida de la capa de hidratación, lo que determina su insolubilización (Romero del Castillo y Mestres, 2004).

### *Proteínas del suero*

Son moléculas compactas, globulares, solubles en un intervalo de pH muy amplio (incluso pH ácido). En estado natural no se asocian con las caseínas, pero en las leches tratadas térmicamente y homogeneizadas hay una fracción que sí lo hace (Badui, 2006).

El suero de leche está conformado por ocho proteínas diferentes, entre las cuales destacan la  $\beta$ -lactoglobulina, la  $\alpha$ -lactoalbúmina, las inmunoglobulinas, la albúmina bovina y las proteasas peptonas. Las seroproteínas son claramente sensibles al calor: la desnaturalización comienza a 65 °C y casi se completa cuando las proteínas se calientan a 90 °C durante cinco minutos. La desnaturalización por calor de las seroproteínas es una reacción de tipo irreversible (Bylund y Gómez, 2003).

Por orden de importancia la  $\beta$ -lactoglobulina es la primera, la cual suma aproximadamente 45% del total de las proteínas del suero. Tiene peso molecular cercano a los 18 kDa, gran solubilidad, movilidad electroforética y naturaleza holoproteica (este término se usa para referirse a la proteína completa, que son proteínas constituidas por una parte polipeptídica y uno o varios grupos no peptídicos) (Alais y Lacasa, 1985).

La  $\beta$ -lactoglobulina es soluble en soluciones diluidas de sales; se desnaturaliza y precipita a menos de 73 °C por la acción de soluciones al 50% de sulfatos de magnesio o amonio. Sus aminoácidos hidrófilos y los ionizables se encuentran distribuidos de manera homogénea, provocando que los apolares establezcan una alta hidrofobicidad en el centro de la molécula; esta característica hace que se hidrate fuertemente en el exterior y que no se puedan unir entre ellas en forma hidrófoba. La  $\beta$ -lactoglobulina es comúnmente utilizada como estabilizante de emulsiones y espumas debido a sus propiedades surfactantes (Almécija y col., 2007; Badui, 2006).

La  $\alpha$ -lactalbúmina tiene un peso molecular próximo a 16 kDa y una secuencia de aminoácidos parecida a la lisozima del huevo. Tiene una estructura globular compacta con cuatro disulfuros y se desnaturaliza a 63 °C, pero vuelve a su estado natural con el enfriamiento. Al igual que la  $\beta$ -lactoglobulina se insolubiliza por calor antes de los 100 °C (Romero del Castillo y Mestres, 2004).

Las inmunoglobulinas suman 10% del suero de la leche, y son moléculas de glucoproteínas con un alto contenido de grupos azufrados y con una actividad biológica de anticuerpo. Su peso molecular es cercano a 180 kDa. Son componentes importantes de la membrana del glóbulo de grasa y promotoras del cremado, además de que contribuyen a las propiedades antibacterianas naturales de la leche. Las globulinas son las primeras en desnaturalizarse durante el calentamiento (Alais y Lacasa, 1985; Badui, 2006).

Las proteasas peptonas son una fracción pequeña de la magnitud de las inmunoglobulinas (0.6 g/l); poseen un peso molecular inferior a 10 kDa, precipitan en gran parte por el ácido tricloracético al 12% y no se dializan; se distinguen porque no precipitan por el calentamiento a 95-100 °C. Algunas contienen grupos glúcidos y fosfato (Alais y Lacasa, 1985).

Las proteínas del suero tienen estructuras globulares, por lo que tienen un mejor balance de aminoácidos, provocando una buena adsorción en la interfase, donde los hidrófilos quedan en la superficie y los apolares establecen una alta hidrofobicidad en el centro de la molécula. Son muy solubles, lo cual se da en un intervalo amplio de pH debido a que en la superficie contienen más aminoácidos hidrófilos que hidrófobos. El punto isoeléctrico de las proteínas del suero de leche se presenta en el Cuadro 1.6. Además, las proteínas del suero de leche son termosensibles, siendo ésta una reacción de tipo irreversible; las proteínas se agrupan al azar con caseínas y mediante puentes de azufre. Las propiedades reológicas de las proteínas del suero de la leche proveen baja viscosidad. Cuando la leche en polvo es producida, se debe

cuidar que, al mezclarla con agua, la leche reconstituida sea fácilmente soluble, por lo que el secado del producto en la torre de atomización debe ser lo más suave posible pues, como se mencionó, el tratamiento térmico desnaturaliza a las seroproteínas, de forma que el porcentaje de desnaturalización se incrementa con la intensidad del tratamiento térmico (Bylund y Gómez, 2003).

Las proteínas de la leche, debido a sus características físico-químicas y a las interacciones con otros componentes de la leche, determinan en gran medida la estructura y la estabilidad de la mayoría de las espumas a base de leche. Las proteínas del suero de leche han sido reportadas por exhibir mejores propiedades espumantes que las caseínas, mientras que éstas últimas son reconocidas por sus altas propiedades emulsionantes. Una posible explicación es la mayor viscosidad y elasticidad interfacial de las proteínas del suero en comparación con las caseínas, aunque la diferencia en hidrofobicidad proteínica también puede jugar un papel clave, ya que a mayor hidrofobicidad se tienen mejores propiedades superficiales y, por tanto, espumantes. La leche es un complejo multi-componente del sistema del cual las propiedades espumantes, a una temperatura dada, están influenciadas por las interacciones de los componentes, como los lípidos y sales minerales (Narchi y col, 2009; Kinsella, 1984).

Cuadro 1.6.- Punto isoelectrico y peso molecular de las proteínas del suero de la leche (Badui, 2006).

| Proteína                  | Punto isoelectrico | Peso molecular Aprox. (kDa) |
|---------------------------|--------------------|-----------------------------|
| $\beta$ - Lactoglobulina  | 5.13               | 18                          |
| $\alpha$ - Lactoglobulina | 4.2-5.5            | 16                          |
| Albúmina sérica           | 4.7- 4.9           | 65                          |
| Inmunoglobulina G1        | 5.5- 6.8           | 160                         |
| Inmunoglobulina G2        | 7.5- 8.3           | 160                         |
| Lactoferrina              | 8.81               | 80                          |

### **1.3.3 La grasa de la leche**

La grasa de la leche se presenta como pequeños glóbulos o gotitas dispersas en el suero de la leche. Su diámetro oscila entre 0.1 y 20  $\mu\text{m}$ , y se tienen unos 15 mil millones de glóbulos por mililitro. Está compuesta por triglicéridos, diglicéridos y monoglicéridos, ácidos grasos, esteroides, carotenoides, vitaminas (A, D, E y K), otros elementos en trazas y componentes minoritarios. Los glóbulos de grasa no solamente son las partículas más grandes de la leche, sino que también son las partículas más ligeras (con una densidad de  $0.93 \text{ g/cm}^3$  a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ). La grasa de la leche se caracteriza por la presencia de cantidades relativamente importantes de ácido butírico y ácido capríco. La grasa de la leche es líquida a  $37 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo que significa que los glóbulos grasos pueden cambiar su forma fácilmente cuando se exponen a tratamientos mecánicos moderados, sin romperse (Bylund y Gómez, 2003).

En las espumas, la grasa puede jugar un papel importante, ya que la grasa líquida que se esparce puede desplazar las proteínas adsorbidas en la interfase aire-agua de las burbujas y llevar a una desproporción mayor, provocando que las burbujas grandes crezcan a expensas de las pequeñas (Walstra, 1996).

### **1.4 Polisacáridos**

Como se mencionó previamente, los polisacáridos mezclados con proteínas pueden ser utilizados en la industria alimentaria, pues juegan un papel importante en la estructura, textura y estabilidad de muchos alimentos. Algunas veces se adicionan gomas para incrementar la viscosidad y lograr la textura deseada; algunas de éstas pueden interaccionar con las proteínas, de acuerdo con el pH del sistema.

En espumas, el aumento de la viscosidad de la fase continua, puede retardar los fenómenos de drenado y maduración de Ostwald (Walsh y col., 2008). Además,

existen polisacáridos con propiedades tensoactivas que pueden competir con las proteínas por la interfase o interaccionar para potencializar las propiedades de superficie (Jara, 2011).

#### **1.4.1 Organización estructural**

Los polisacáridos son polímeros constituidos por más de 10 monosacáridos unidos por distintos enlaces glucosídicos. La mayoría de los polisacáridos naturales contienen cientos de monómeros y en ocasiones, varios miles; puros, no tienen color, aroma o sabor. Su peso molecular puede llegar a ser hasta de millones de daltones, puesto que las moléculas no son iguales. Se encuentran como cadenas lineales, o bien, ramificadas, que a su vez pueden estar integradas por un solo tipo de monosacárido (homopolisacárido), como el almidón y la celulosa, o también por varios tipos de monosacáridos (heteropolisacárido), como lo es el caso de la mayoría de las gomas (Badui, 2006).

#### **1.4.2 Propiedades funcionales de los polisacáridos**

Las gomas son polisacáridos de alto peso molecular, derivadas de una variedad de fuentes, tales como bacterias y plantas; no producen verdaderas soluciones, sino debido a su alto peso molecular, forman dispersiones de tamaño coloidal. Las diferencias en la composición de cada goma son el peso molecular y la estructura; esto confiere a cada una propiedades únicas adecuadas para aplicaciones de alimentos diferentes. La elección de la goma depende de su capacidad para interactuar con otros componentes alimenticios (Badui, 2006; Walsh y col., 2008).

El tiempo de hidratación puede ser bastante significativo para algunas gomas; es decir, algunas gomas tardan alrededor de 24 horas en alcanzar su viscosidad máxima o una viscosidad próxima a ella. La viscosidad de muchos hidrocoloides puede verse afectada de manera significativa por el pH del medio y la presencia de sustancias, tales como sales, azúcares y proteínas (Lewis, 1993).

### 1.4.3 Interacción con proteínas

Muchas de las mezclas proteína-polisacárido se utilizan en la fabricación de dispersiones que contienen dos o más fases inmiscibles (agua-aceite, y / o gas) en forma de espumas y emulsiones. La estabilidad de estos sistemas se consigue, generalmente, a través de una capa protectora interfacial alrededor de las partículas (gotitas de la emulsión o burbujas de espuma). Las propiedades de esta capa interfacial se rigen por la composición y la estructura del material adsorbido (Rodríguez y Pilosof, 2011).

Las moléculas de proteínas y polisacáridos pueden unirse entre sí mediante un enlace covalente; sin embargo, la solubilidad deficiente de la proteína impide estas uniones. El calentamiento en seco de estas mezclas puede solubilizar a las mismas, además de mejorar la estabilidad coloidal y funcionalidad interfacial en determinadas condiciones (a pH cerca del punto isoelectrico y en altas concentraciones de electrolitos) (Rodríguez y Pilosof, 2011).

Por otro lado, las moléculas de proteínas y polisacáridos también se pueden asociar a través de interacciones físicas. Estas interacciones no covalentes (interacciones electrostáticas e hidrofóbicas, puentes de hidrógeno, entre otros) entre biopolímeros tienen influencia en las características interfaciales de las películas, en la formación y estabilidad de la dispersión. Con polisacáridos cargados, la contribución de las interacciones electrostáticas es la predominante. Son formados fuertes complejos electrostáticos con mezclas de proteínas cargadas positivamente y polisacáridos cargados negativamente. Así, al ajustar el *pH* y / o la fuerza iónica de la fase continua, la fuerza de las interacciones proteína-polisacárido puede variar sustancialmente (Rodríguez y Pilosof, 2011). La formación de complejos entre proteínas y polisacáridos aniónicos, como la goma xantana, ocurre debajo del punto isoelectrico de las proteínas, donde existe la compatibilidad debido a que sus cargas son opuestas (Tolstoguzov, 1996).

Al mezclar un polisacárido y una solución de proteína se puede observar cualquiera de las posibilidades representadas en la Figura 1.11. Para soluciones muy diluidas, la mezcla es estable, por lo que proteínas y polisacáridos son co-solubles (c); no obstante, al aumentar la concentración de los biopolímeros, pueden tener lugar fenómenos de asociación o de segregación (d). En el primer caso, las interacciones de atracción entre la proteína y polisacárido puede conducir a la formación de complejos solubles y/o insolubles (Fig. 1.11 a y b), donde la formación de complejos insolubles conduce a un fenómeno de separación de fases, debido a que estos complejos se sedimentan (Rodríguez y Pilosof, 2011).

Las mezclas de proteínas lácteas y polisacáridos se pueden separar en dos fases, resultado de la incompatibilidad termodinámica o del fenómeno de floculación debido a la insolubilidad. El primer caso se confiere a la entropía del sistema, ya que la energía libre de la mezcla es minimizada. En el caso de la floculación, la agregación de partículas es causada por la exclusión de las moléculas del espacio entre partículas, resultando una diferencia de la concentración del polímero entre la interfase y la región que rodea a las burbujas de gas (Hemar y col., 2001).

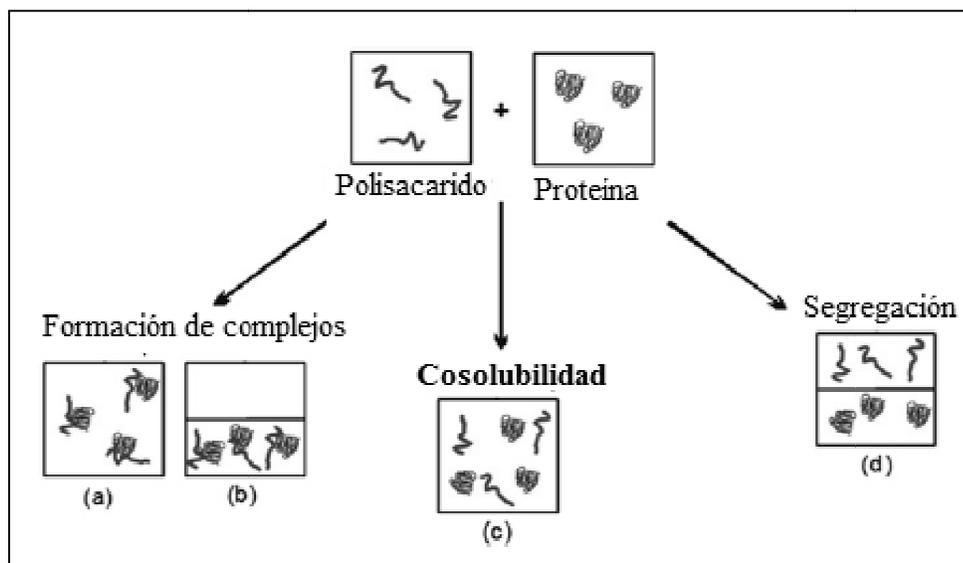


Figura 1.11. Comportamiento de las mezclas proteína-polisacárido (Rodríguez y Pilosof, 2011).

#### 1.4.4 Goma xantana

La goma xantana es un exopolisacárido natural derivado del proceso de fermentación enzimática de la dextrosa por la bacteria *Xanthomonas campestris*. Está formado por dos unidades de D-glucopiranosil, dos unidades de D-manopiranosil y una unidad de ácido glucopiranosilurónico (Figura 1.12) (Cubero y col., 2002).

Las ramificaciones de la molécula de xantana y las características aniónicas debidas a los radicales ácidos favorecen la separación de las cadenas y su hidratación, consiguiendo la solubilización total de la macromolécula. Tiene un alto peso molecular (entre  $10^3$  y  $10^4$  kDa) (Cubero y col., 2002; Narchi y col., 2009).

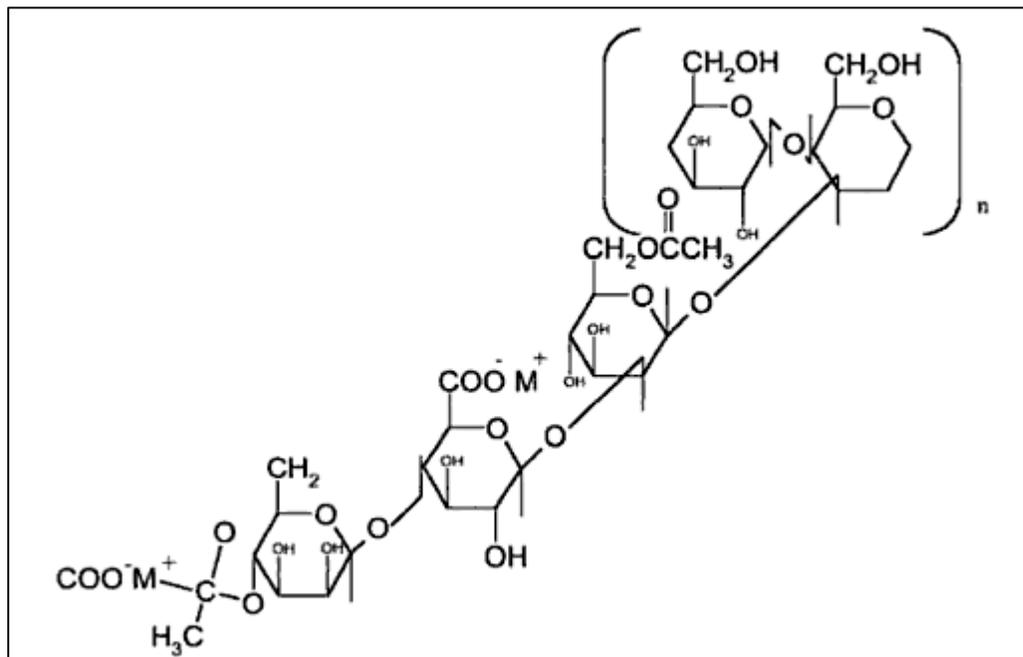


Figura 1.12. Estructura molecular de goma xantana (Cubero y col., 2002).

#### *Propiedades funcionales*

La xantana es soluble en agua y leche en frío. Las cargas negativas en los grupos carboxilos de las cadenas laterales causan que las moléculas formen fluidos muy espesos al ser mezclados con agua; este efecto espesante es de características no

tixotrópicas. Esto quiere decir que, tras un cizallamiento intenso, la viscosidad inicial se recupera instantáneamente (Cubero y col., 2002). La viscosidad se incrementa con la concentración. A una concentración de 1% se pueden lograr viscosidades cercanas a los 2 Pa.s (García y col., 1993). De entre las propiedades reológicas que poseen las soluciones de xantana destaca la fluidificación a la cizalla, que se refiere a la propiedad que tienen sus soluciones de disminuir la viscosidad al aumentar la velocidad de cizalla en el fluido; sin embargo, durante el reposo y hasta una cierta velocidad de cizalla, las soluciones de goma xantana se comportan como fluidos newtonianos, debido a que la molécula de goma xantana en solución acuosa tiene dos conformaciones, doble hélice y extendida (dependen de la temperatura de la disolución), que impiden que fluyan hasta que se llega a velocidades de cizalla mayores. Una forma de representar matemáticamente el comportamiento reológico de las soluciones de xantana es mediante el denominado modelo de Carreau:

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 + (t_c \cdot \dot{\gamma})^b]^{p/2}$$

Donde:  $\eta_0$  = viscosidad constante a bajas velocidades de cizalla (Pa.s);  $\eta_{\infty}$  = viscosidad constante a altas velocidades de cizalla (Pa.s);  $t_c$  = tiempo característico (s);  $p = n-1$ , exponente de Carreau (adimensional). En la ecuación de Carreau-Gahleitner, el parámetro  $b$  es igual a 2. La ecuación de Carreau describe la curva de viscosidad de materiales con zonas newtonianas a bajas y altas velocidades de cizalla y un comportamiento adelgazante a la cizalla a velocidades medias de cizalla, como se muestra en la Figura 1.13 (Paar Physica, 2006).

Se considera a la goma xantana un agente de control reológico en sistemas acuosos, y como estabilizante en emulsiones y suspensiones. La viscosidad de sus soluciones prácticamente no cambia en un intervalo entre 4 y 94 °C, y lo mismo sucede en un intervalo de pH entre 1 y 13. Fuerzas iónicas equivalentes a soluciones de cloruro de sodio entre 0.05 y 1% no tienen efecto en la viscosidad. Después de tratamientos térmicos, como esterilización o pasteurización, se recupera una vez enfriada y sin

experimentar cambios de textura. Es bastante estable a los tratamientos mecánicos y tiene muy buena resistencia a los ciclos de congelación-descongelación (Cubero y col., 2002).

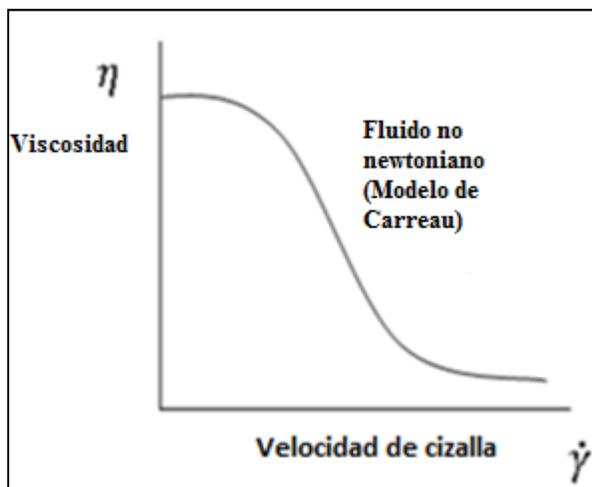


Figura 1.13. Modelo de Carreau (Paar-Physica)

Tiene particularmente un efecto sinérgico con la goma de algarrobo, obteniendo estructuras de gel elástico y cohesivo, con la goma guar aumenta en gran medida la viscosidad de los productos. Algunas aplicaciones en la industria de alimentos son: ensaladas, productos de pastelería, panadería, bebidas, productos instantáneos, alimentos enlatados, sopas, salsas, productos congelados, confitería y repostería, productos lácteos y derivados, productos cárnicos, así como también en productos dietéticos. Al adicionar proteínas lácteas a disoluciones de goma xantana, el comportamiento reológico es similar al de la goma xantana sola, especialmente a bajas velocidades de cizalla (Cubero y col., 2002; Hemar y col., 2001).

#### *Estudios de la goma xantana en espumas*

Las aplicaciones de la goma xantana en espumas lácteas han sido motivo de investigación de los últimos años, pues sus propiedades espesantes retardan la desestabilización de las mismas. En el estudio realizado por Narchi y col., (2009), la

xantana se utilizó como espesante. Este estudio señala que la goma xantana está cargada negativamente en el intervalo de pH normalmente utilizado para los alimentos, y pudiendo presentar interacciones electrostáticas con las proteínas; no obstante, existe incompatibilidad termodinámica entre las proteínas lácteas y la goma xantana. La goma xantana muestra una viscosidad alta, lo cual se puede atribuir a la rigidez de las cadenas de xantana y a su carga negativa, que aumenta su capacidad para formar una doble hélice a través de enlaces de hidrógeno. Al mezclar la goma xantana con proteínas de suero de leche, la viscosidad aumenta todavía más. Se mostró incompatibilidad entre la goma xantana y suero de leche a *pH* 6,8; resultado de las interacciones electrostáticas de repulsión. En la espuma formada, la adición de goma xantana beneficia la estabilidad debido a la alta consistencia de la fase continua; sin embargo, reduce el rendimiento y el tamaño de burbuja, lo que se puede atribuir al incremento de la viscosidad y a la incompatibilidad termodinámica entre suero de leche y goma xantana (Narchi y col., 2009).

Por otro lado, Zhao y col. (2009) realizaron un estudio sobre el efecto de la goma xantana sobre las propiedades físicas y texturales de crema batida, donde se encontró que la concentración de goma xantana no tuvo ningún efecto significativo en el rendimiento de la crema batida; pero la firmeza de la misma, con el nivel de goma xantana de 0.025-0.050 %, fue significativamente menor que con el de 0.075-0.125 %, resultando la última más estable. Además, también mostró efectos positivos sobre la consistencia y cohesión de la crema batida.

## **CAPÍTULO II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

### **2.1 Objetivos**

#### **2.1.1 Objetivo general**

Determinar el efecto de la mezcla de concentrado de suero de leche y goma xantana sobre la densidad, pH y propiedades reológicas de la fase continua, así como su impacto sobre el rendimiento y la estabilidad de espumas elaboradas con leche descremada, con la finalidad de mejorar la estabilidad de alimentos lácteos aireados.

#### **2.1.2 Objetivos particulares**

1. Evaluar el efecto de la mezcla de concentrado de suero de leche y goma xantana sobre la densidad, pH, tamaño de partícula y propiedades reológicas de la fase continua de espumas elaboradas con leche descremada.
2. Evaluar el efecto de la mezcla de concentrado de suero de leche y goma xantana sobre la capacidad espumante de la leche descremada.
3. Evaluar el efecto de la mezcla de concentrado de suero de leche y goma xantana sobre la estabilidad de espumas elaboradas con leche descremada mediante pruebas de drenado y dispersión de luz a través de la espuma.

### **2.2 Diseño experimental**

Con la finalidad de evaluar los diferentes efectos propuestos, se fijó la concentración de leche descremada en polvo al 10% y con las concentraciones límite correspondientes de goma xantana y concentrado de suero de leche, se aplicó un diseño factorial multinivel, de dos factores con tres niveles cada uno, como se muestra en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Niveles utilizados por cada variable independiente (% m/m).

| Variables independientes        | Niveles |       |       |
|---------------------------------|---------|-------|-------|
|                                 | Alto    | Medio | Bajo  |
| Concentración de goma xantana   | 0.15%   | 0.10% | 0.05% |
| Concentración de suero de leche | 20%     | 15%   | 10%   |

Se realizaron dos réplicas por cada corrida, generando 18 experimentos. A continuación se muestra la matriz de forma tipificada:

Cuadro 2.2. Matriz experimental del diseño experimental.

| Orden Secuencial | Factores       |                                 |                    |
|------------------|----------------|---------------------------------|--------------------|
|                  | % Goma xantana | % Concentrado de suero de leche | % leche Descremada |
| 1                | 0.05           | 10                              | 10                 |
| 2                | 0.05           | 15                              | 10                 |
| 3                | 0.05           | 20                              | 10                 |
| 4                | 0.10           | 10                              | 10                 |
| 5                | 0.10           | 15                              | 10                 |
| 6                | 0.10           | 20                              | 10                 |
| 7                | 0.15           | 10                              | 10                 |
| 8                | 0.15           | 15                              | 10                 |
| 9                | 0.15           | 20                              | 10                 |
| 10               | 0.05           | 10                              | 10                 |
| 11               | 0.05           | 15                              | 10                 |
| 12               | 0.05           | 20                              | 10                 |
| 13               | 0.10           | 10                              | 10                 |
| 14               | 0.10           | 15                              | 10                 |
| 15               | 0.10           | 20                              | 10                 |
| 16               | 0.15           | 10                              | 10                 |
| 17               | 0.15           | 15                              | 10                 |
| 18               | 0.15           | 20                              | 10                 |

Este diseño sirvió para el análisis de la influencia de cada factor sobre las variables de respuesta en la fase continua y la espuma formada con la misma.

## 2.3 Materiales

Para la preparación de las fases continuas, se utilizó:

- Agua purificada (marca e pura),
- Leche en polvo descremada y pasteurizada de vaca (marca Toronto, elaborada por Grupo Lamesa, S.A de C.V.) con humedad promedio de  $4.74 \% \pm 0.10$ .
- Concentrado de suero de leche (marca Dairy Gold), obtenido por atomización con 34% de proteína y humedad de  $5.48 \% \pm 0.04$ .
- Goma xantana (elaborada por Kelco, Keltrol) con humedad promedio de  $10.32 \% \pm 0.45$ .

Los valores de humedad fueron obtenidas utilizando la termobalanza marca Ohaus, Suiza, modelo MB45. Las condiciones usadas en la termobalanza fueron las siguientes:

Cuadro 2.3. Condiciones para determinar el porcentaje de humedad.

|                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| Leche en polvo                | 100 °C, $\theta = 60$ min |
| Concentrado de suero de leche | 100 °C, $\theta = 60$ min |
| Goma xantana                  | 110 °C, $\theta = 30$ min |

Para la preparación de las fases continuas, se utilizó una balanza analítica Adventurer marca Ohaus, Suiza.

## 2.4 Actividad preliminar

### 2.4.1 Determinación del tiempo y velocidad de batido

El tiempo y la velocidad de batido influyen sobre el rendimiento de los agentes espumantes, por lo que el batido debe ser moderado ya que si la película es sometida a un alto estiramiento, la ruptura ocurre casi inmediatamente, se probaron distintas

velocidades y tiempos de batido para seleccionar los mismos que brinden un alto rendimiento sin dañar la estructura de la espuma formada.

**Equipo:** batidora planetaria modelo K5SS, marca KitchenAid Inc., EUA. (Figura 2.1)



Figura 2.1. Batidora planetaria

**Procedimiento:**

1. Se prepararon ocho muestras de 600 g con las concentraciones más bajas de goma xantana y concentrado de suero de leche (0.05 % y 10 % respectivamente), utilizando agua e pura y en porcentaje masa/masa. La dispersión de los polvos se realizó a temperatura ambiente utilizando un agitador de propelas Heidolph (marca Caframo, Canadá), con velocidad de agitación de 1000 rpm como máximo para evitar formar espuma, el orden de agregación de los mismos fue iniciando con la goma xantana, posteriormente el concentrado de suero de leche y finalmente la leche descremada, el tiempo cambió con cada concentración.
2. Una vez obtenidas las muestras, se batieron utilizando la batidora planetaria por diferentes tiempos (10 y 20 minutos) y velocidades (4 y 6), cada combinación se realizó por duplicado.
3. Una vez obtenida la espuma, se midió el volumen alcanzado.

Se tomaron las concentraciones menores de proteína y polisacárido para evaluar la influencia del tiempo y velocidad de batido en una concentración constante.

### **Secuencia de cálculo**

1. Se calculó la capacidad espumante o rendimiento mediante la siguiente ecuación (Badui, 2006):

$$\text{rendimiento} = \frac{\text{Vol de la espuma} - \text{Vol del líquido inicial}}{\text{Vol del líquido inicial}} \times 100 \quad 2.1$$

Se seleccionó la combinación de velocidad y tiempo que aportó un mayor rendimiento.

## **2.5 Métodos**

### **2.5.1 Preparación de la fase continua**

Se prepararon muestras de 600 g utilizando agua e pura y en porcentaje masa/masa y de igual forma como se realizó para la actividad preliminar antes del batido.

### **2.5.2 Propiedades de la fase continua**

#### **DENSIDAD**

**Instrumento:** Densímetro digital modelo DMA 38 marca Anton Paar, Austria (Figura 2.2).

**Fundamento:** Su principio se encuentra descrito en el método ASTM D 4052. Una pequeña cantidad de muestra es introducida en un tubo de cuarzo que vibra a una frecuencia determinada. El funcionamiento del instrumento se basa en el cambio de la oscilación del tubo de cuarzo cuando se introduce la muestra y lo transforma en la

densidad de la muestra. El instrumento proporciona una lectura digital de cualquier densidad o gravedad específica (Koleske, 1995).



Figura 2.2. Densímetro DMA 38.

### **Procedimiento:**

1. Se verificó que la densidad del aire marcara aproximadamente  $0.0013 \text{ g/cm}^3$ , a una temperatura de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , para asegurarse de la limpieza del capilar.
2. De las dos jeringas que se tienen, se llenó una con la muestra a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y con ella el tubo de vidrio en el aparato.
3. Se colocó un vaso de precipitados al final de la manguera de salida para recibir los desechos.
4. Se esperó a que el aparato de la lectura de densidad de la muestra. Este valor se tomó cuando los valores de densidad relativa y densidad absoluta que marcó el aparato en el tablero no cambiaron en aproximadamente un minuto. La densidad absoluta corresponde a la temperatura de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  a los que se colocó la muestra.
5. La salió por la manguera y cayó en el vaso de precipitados.
6. Se realizaron 3 repeticiones por muestra.
7. Para lavar el instrumento, se llenó la jeringa con agua destilada y se enjuagó el tubo de vidrio, éste procedimiento se realizó 3 veces, en caso necesario, se aplicó una solución jabonosa.

8. Se encendió la bomba para secar el tubo hasta que el equipo marcó de nuevo la densidad del aire. Finalmente se apagó y desconectó el instrumento.

## pH

**Instrumento:** Potenciómetro manual, marca Waterproof, modelo pHTestr 3 double junction de Oakton Instruments, EUA.

**Fundamento:** El potenciómetro consiste en dos electrodos, uno de los cuales tiene una membrana sensible al hidronio [ $\text{H}_3\text{O}^+$ ]. Estos electrodos miden [ $\text{H}_3\text{O}^+$ ] como una diferencia de potencial eléctrico entre ellos. Esta diferencia de potencial es indicada como valores de pH en una pantalla o escala que posee el potenciómetro (Lanore, 1995).



Figura 2.3. pHTestr 3.

### **Procedimiento:**

1. Se calibró el potenciómetro utilizando una solución amortiguadora (pH 7 y pH 4)
2. Se colocó la muestra en un vaso de precipitados de 100 ml.
3. Se introdujo el electrodo en la muestra.
4. Se tomó la lectura.
5. Se realizaron 10 repeticiones por muestra.
6. Se enjuagó el potenciómetro en una solución jabonosa y en agua destilada.

## TAMAÑO DE PARTÍCULA

**Instrumento:** Granulómetro de rayo laser (Cilas 930 LD, Francia).

**Fundamento:** Utiliza la dispersión estática de luz que permite determinar la distribución y tamaño de partícula de materiales. Consiste en la dispersión de la muestra en un líquido a través de una celda o acarreador con un sistema de recirculación de medición de la cual es atravesada por el haz láser (Beristain, 2001)



Figura 2.4 Granulómetro de rayo laser (CILAS 1180 LD).

### **Procedimiento:**

Se realizaron 3 repeticiones al inicio sin aplicar ultrasonido y 3 repeticiones con ultrasonido por muestra. El ultrasonido es una forma de agitación que rompe posibles agregados, al realizar la medición primero sin ultrasonido y posteriormente con ultrasonido se puede observar si existen o no agregados en la dispersión.

1. Se tomó la muestra con una pipeta de 10 ml para colocar 2 ml en el equipo e iniciar la medición.
2. Se obtuvo el histograma de distribución de (Figura 2.5), así como el diámetro promedio.

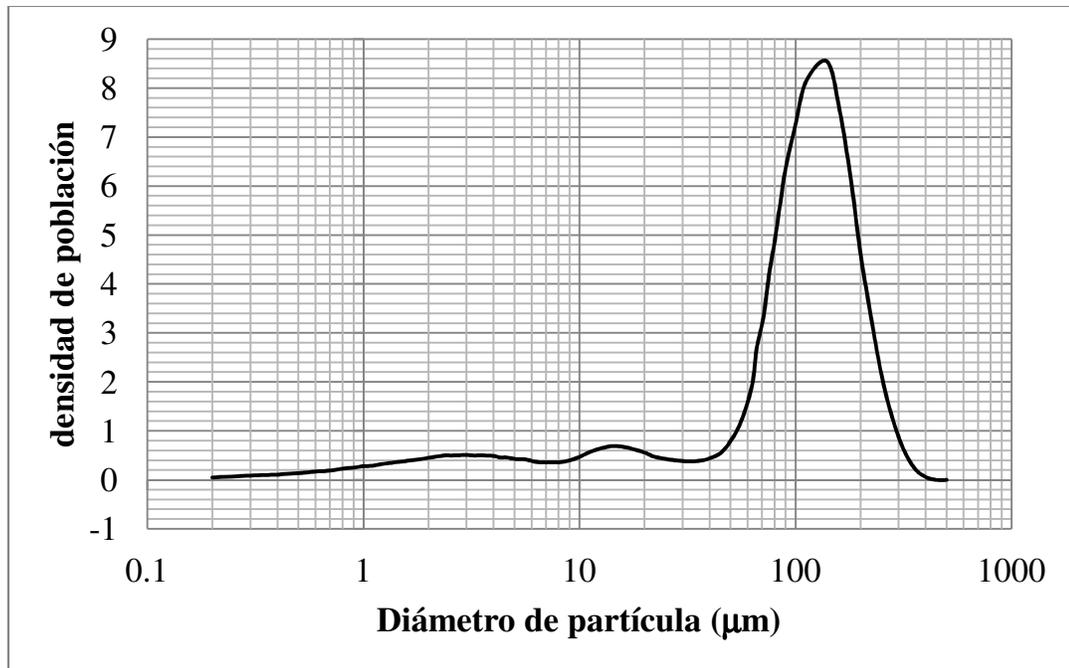


Figura 2.5. Curva de valores acumulados hasta el 100% en función del diámetro.

## PROPIEDADES DE FLUJO

**Instrumento:** Reómetro modelo LS-100 marca Paar-Physica, con baño de temperatura constante marca Julabo, con geometría de doble pared.

**Fundamento:** La muestra se perturba mucho menos cuando se utiliza la geometría de cilindros concéntricos de doble pared y los efectos de borde son insignificantes. Se transfiere cantidad de movimiento en la muestra contenida entre los dos cilindros, desde el cilindro que gira a una velocidad de rotación, hasta la pared del cilindro que contiene la muestra (en régimen laminar). Se mide el par de torsión o torque del motor, requerido para mover la geometría y se transforma a esfuerzo de cizalla (Martínez, 2001). Para la geometría mostrada en la Figura 2.6., la ecuación para obtener el esfuerzo de cizalla ( $\sigma$ ) es (Rao, 2007):

$$\sigma = \frac{M}{2\pi h(r_2^2 + r_3^2)}$$

Donde  $M$  es el torque,  $h$  es la altura del cilindro interno. Reconociendo que el fluido se cizalla en las superficies con radios  $r_2$  y  $r_3$  se tiene para la velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ):

$$\dot{\gamma} = 2\Omega \left[ \frac{1}{1 - \left(r_1/r_2\right)^2} + \frac{1}{1 - \left(r_3/r_4\right)^2} \right]$$

Donde  $M$  = par de torsión y  $\Omega$  = velocidad angular

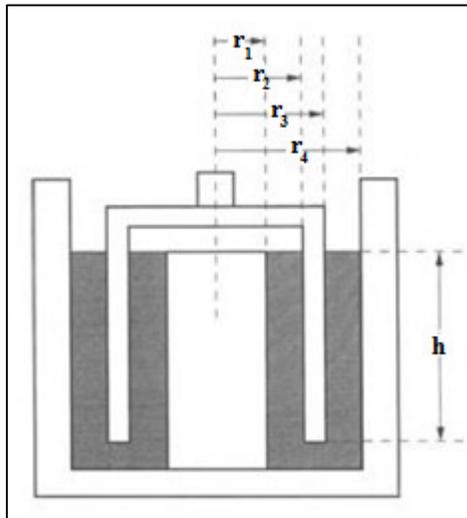


Figura 2.6. Geometría de cilindros concéntricos de doble pared (Rao, 2007).

### Procedimiento:

1. Se encendió el compresor a  $100 \text{ (lb/cm}^2\text{)}$
2. Se colocó el baño a temperatura constante a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .
3. Se señaló el dispositivo de doble pared en condiciones de prueba.
4. Se seleccionó la posición de medida en el programa con la finalidad de que el programa reconociera el dispositivo de medición.

5. Se programó el equipo para controlar el esfuerzo de cizalla ( $\sigma$ ) y obtener la velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ) resultante.
6. Para los segmentos uno y dos, se establecieron 25 puntos de esfuerzo de cizalla de ascenso y 25 de descenso (para este sistema el intervalo de torque inició en 1E-3 y terminó en 0.05 mNm). Para el segmento tres, se establecieron 25 puntos de 0.1 a 100 (1/s) de velocidad de cizalla, para confirmar que no hay dependencia con el tiempo de cizallamiento (curva al equilibrio).
7. Se colocaron 7.5 ml de muestra en el dispositivo e iniciar la medición.
8. Al finalizar la medición retirar el dispositivo, lavar con solución jabonosa, enjuagar y secar.

**Secuencia de cálculo:**

1. De los datos obtenidos de esfuerzo de cizalla y velocidad de cizalla, se realizó el grafico de  $\eta = f(\dot{\gamma})$  (Figura 2.7 lado derecho) y el gráfico de  $\sigma = f(\dot{\gamma})$  (Figura 2.7 lado izquierdo).

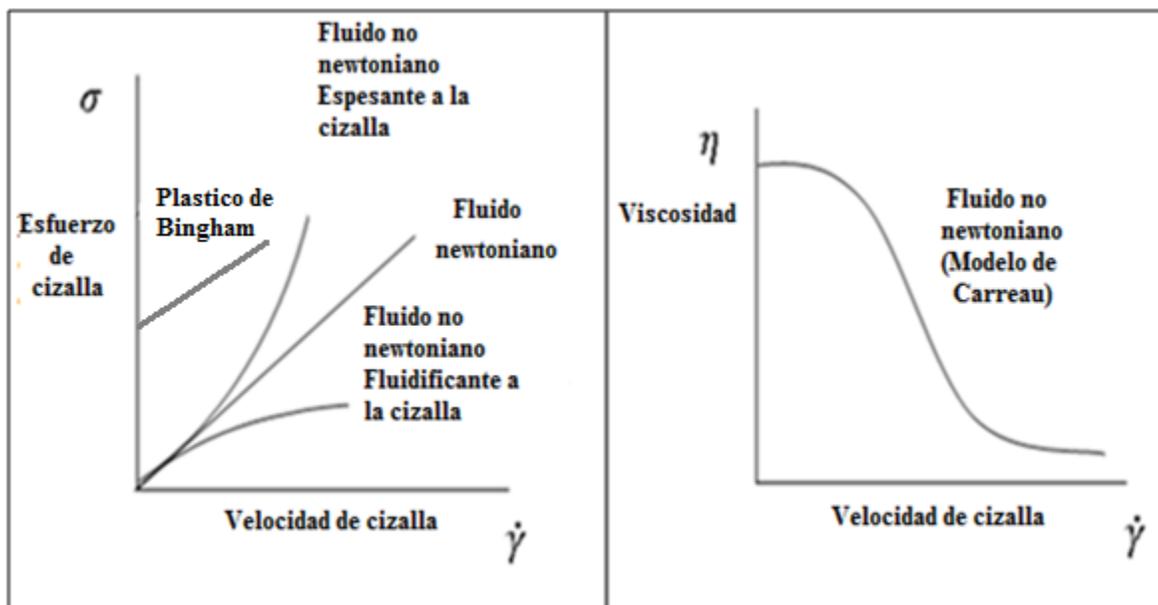


Figura 2.7. Tipos de fluidos (Ramírez, 2006).

2. Se realizaron diferentes regresiones a los segmentos uno y dos, para elegir el segmento y el modelo que mejor se ajuste de acuerdo con el valor de  $r^2$  (más cercano a 1) y obtener los parámetros reológicos correspondientes (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4. Modelos reológicos (Steffe, 1996)

| Tipo de Fluido           | Modelo     | Ecuación  |
|--------------------------|------------|---|
| Newtoniano               | Newtoniano | $\sigma = \eta \dot{\gamma}$  |
| No newtoniano            |            |   |
| Plástico                 | Bingham    | $\sigma = \sigma_0 + \eta \dot{\gamma}$   |
| Adelgazante a la cizalla | Potencia   | $\sigma = K \dot{\gamma}^n$<br>$0 < n < 1$  |
|                          | Carreau    | $\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty)[1 + (t_c \cdot \dot{\gamma})^b]^{p/2}$ |
| Espesante a la cizalla   | Potencia   | $\sigma = K \dot{\gamma}^n$<br>$1 < n < \infty$                                     |

### 2.5.3 Preparación de la espuma

Para la preparación de la espuma se usó el resto de la fase continua la cual fue de aproximadamente 500 ml, el batido se realizó el mismo día de la preparación de la fase continua utilizando la batidora planetaria (Figura 2.1) con la velocidad y tiempo determinados en la actividad preliminar.

### 2.5.4 Propiedades de la espuma

#### RENDIMIENTO

**Equipo:** batidora planetaria modelo K5SS, KitchenAid Inc., USA. (Figura 2.1)

**Fundamento:** El rendimiento es la capacidad espumante de los surfactantes, que se refiere a la cantidad de área en la interfase que puede ser creada por el agente

tensoactivo, se calcula a partir del volumen generado con respecto al volumen de líquido utilizado (Badui, 2006).

### **Procedimiento:**

1. Se graduó el tazón de la batidora cada 100 ml.
2. Se midió el volumen de la fase continua antes de espumar.
3. Se batieron las muestras utilizando la batidora planetaria.
4. Una vez obtenida la espuma, se midió el volumen alcanzado.

### **Secuencia de cálculo**

Se calculó el rendimiento mediante la ecuación 2.1.

## **DIÁMETRO DE BURBUJA**

**Instrumento:** Microscopio óptico Olympus CX-31 (Figura 2.8), Cámara Evolution LC Kit y programa de análisis Image-Pro Discovery.



Figura 2.8. Microscopio óptico Olympus CX-31.

**Fundamento:** Este instrumento funciona por dispersión de luz, lo que permite obtener una imagen aumentada del objeto a observar con la ayuda de uno o varios lentes.

**Procedimiento:**

1. Se colocó cuidadosamente la muestra en el hemocitómetro que cuenta con una profundidad de 0.1 mm, lo cual evita que la estructura y tamaño de las burbujas se modifique.

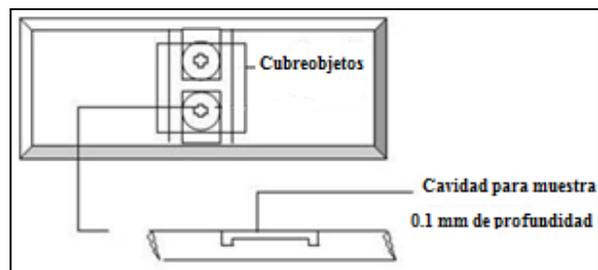


Figura 2.9. Hemocitómetro con profundidad de 0.1mm

2. Se enfocó el microscopio en el objetivo 10x y capturar 3 fotos.
3. Se seleccionó en el programa el objetivo utilizado y se midieron al azar 30 burbujas por cada muestra.
4. Se realizó lo anterior nuevamente después de una hora.

\*Al utilizar el objetivo 10x, los diámetros resultantes son medidos en  $\mu\text{m}$ .

## DRENADO EN COPAS DE ESTABILIDAD

**Instrumento:** Copas de estabilidad (Figura 2.10)

**Fundamento:** Las copas de estabilidad cuantifican el volumen de líquido drenado de la espuma, controlando el volumen de ésta. Consiste en la unión de un vaso de precipitados de 150 ml a una probeta de 10 ml.

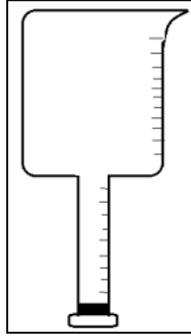


Figura 2.10. Copa de estabilidad

### Procedimiento:

1. Se colocó una capa delgada de fibra de vidrio con un peso de aproximadamente 0.14 g, dentro de la copa, en la división del vaso y la probeta.
2. Se colocó 150 ml de espuma en la copa de estabilidad
3. Se midió el tiempo y se registró cuando empezó a drenar, según la velocidad, se midió el volumen cada minuto o cada más tiempo.

### Secuencia de cálculo:

1. Se realizaron graficas de volumen de líquido drenado con respecto al tiempo (Figura 2.11).

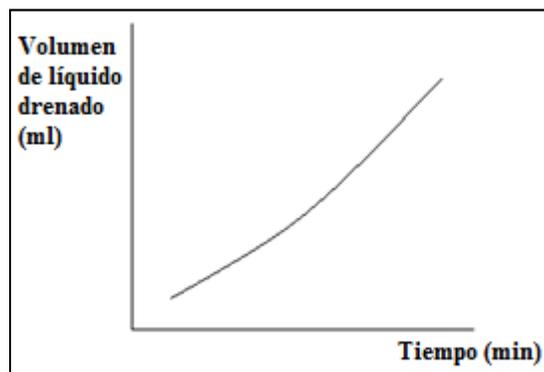


Figura 2.11. Gráfico del volumen de líquido drenado con respecto al tiempo.

2. Se realizaron regresiones para obtener el modelo que mejor se ajuste (lineal, logarítmico, potencial, exponencial, entre otros).

## ESTABILIDAD POR DISPERSIÓN DE LUZ

**Instrumento:** Turbiscan MA2000

**Fundamento:** Este instrumento mide la transmisión y retrodispersión de la luz en un tubo de cristal que contiene la espuma. Consiste en un cabezal de lectura que se mueve a lo largo del tubo de cristal, que toma lecturas de la luz transmitida o retrodispersa cada 40  $\mu\text{m}$  en una altura de muestra máxima de 80 mm. El barrido se puede repetir con una frecuencia programable para obtener una huella digital macroscópica de la muestra. El cabezal de lectura usa una fuente de luz pulsada cercana al infrarrojo. El detector de transmisión recoge la luz transmitida a través de la disolución en el tubo a  $0^\circ$ , y el detector de retrodispersión, recibe la luz retrodispersa por el producto a  $135^\circ$ . En formulaciones aireadas simples donde las burbujas de aire conforman la fase dispersa, los cambios de tamaño de burbuja pueden ser monitoreados a través de variaciones en la luz dispersada por la zona central del tubo de cristal. El nivel de retrodispersión está relacionado con el transporte libre de fotones recorrido a través del tubo de cristal (González, 2009; Cox y col, 2009).

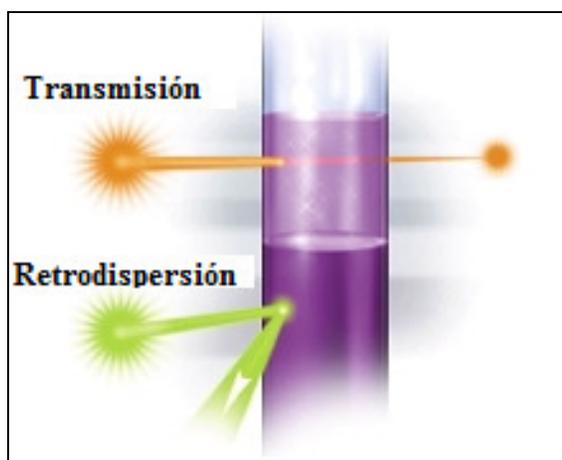


Figura 2.12. Dispersión y retrodispersión de luz a través de una solución en el tubo de cristal (Cox y col., 2009).

### **Procedimiento:**

1. Se colocó la celda de medición sobre la espuma para que ésta entrara, la altura de la muestra fue mayor a 6.5 mm.
2. Se cerró la celda con el tapón de rosca y se limpió el tubo por fuera.
3. Se colocó la muestra totalmente vertical, despacio y firmemente dentro del Turbiscan y se inició la medición, cada minuto durante 1 hora.

\*El tiempo entre cada medición y la duración varió con cada muestra.

### **Secuencia de cálculo:**

El software proporcionó un gráfico donde se observaron algunos fenómenos de desestabilización como drenado y aumento de tamaño de burbuja, como se observa en la Figura 2.13.

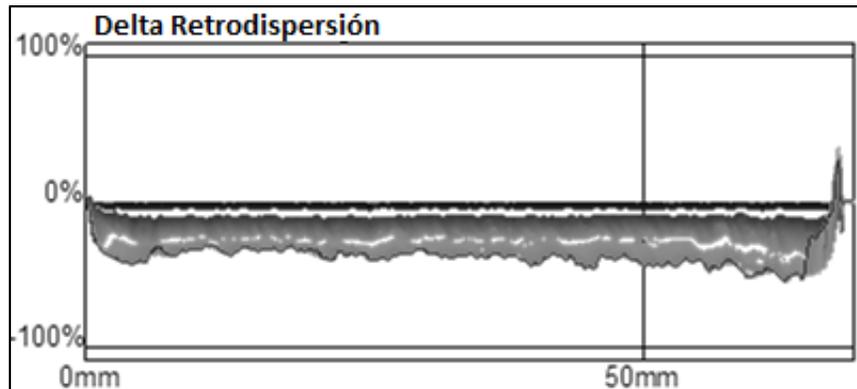


Figura 2.13. Curva donde se puede observar el fenómeno de aumento de tamaño de burbuja a través del tiempo en una espuma.

### **2.5.5 TENSIÓN SUPERFICIAL Y MÓDULOS DILATAACIONALES**

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas de estabilidad, se seleccionaron tres fases continuas con tres niveles de estabilidad (mayor, menor, intermedia) a las cuales se les realizaron pruebas de tensión superficial y de reología dilatacional con el fin de relacionar los módulos elástico y viscoso con la estabilidad.

**Instrumento:** Tensiómetro PAT-1 Sinterface

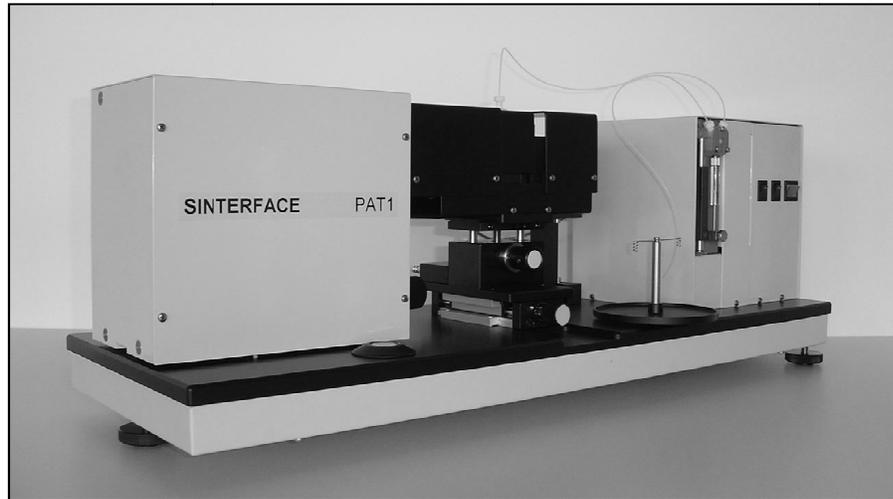


Figura 2.14. Tensiómetro PAT-1 Sinterface (Miller y Makievski, 2012).

**Fundamento:** El principio de este instrumento se basa en determinar la tensión superficial de un líquido por medio de la gota pendiente o burbuja flotante. Esta forma está dada por la ecuación de Gauss-Laplace, la cual representa la relación entre la curvatura del menisco de un líquido y la tensión superficial  $\gamma$ :

$$\gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \Delta P_0 + \Delta \rho g z$$

Donde:  $R_1$  y  $R_2$  son los radios de curvatura en un punto dado de la superficie,  $\Delta P_0$  es la diferencia de presión en el plano de referencia,  $\Delta \rho$  es la diferencia de densidad,  $g$  es la aceleración de la gravedad, y  $z$  es la altura de la gota.

Este método permite la determinación de la tensión superficial a partir del cálculo de diversos factores de forma o parámetros geométricos que caracterizan el perfil de una gota: diámetro máximo o ecuatorial de la gota ( $DE = R_1 \times 2$ ), diámetro de cuello ( $DS = R_2 \times 2$ ), y radio de curvatura en el ápice de la misma ( $R_0$ ), los cuales se representan en la Figura 2.15.

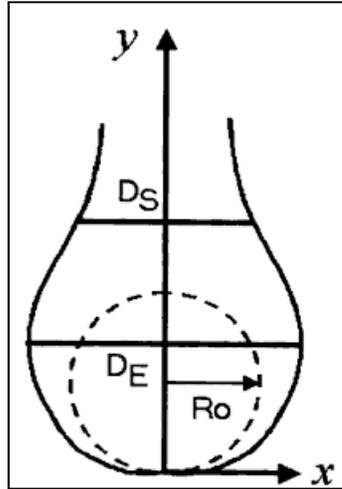


Figura 2.15. Esquema de la gota colgante (Fuentes y López de Ramos, 2001).

Se mide la tensión superficial continuamente hasta que permanece constante, se realiza un gráfico como el que se muestra en la Figura 2.16 (Fuentes y López de Ramos, 2001).

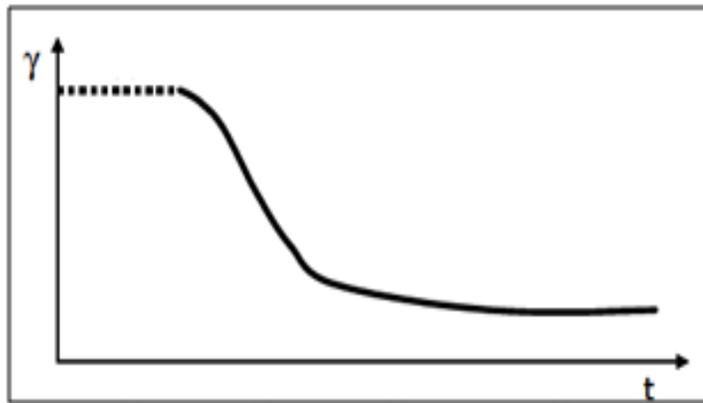


Figura 2.16. Ejemplo de gráfico de tensión superficial (mN/m) en función del tiempo (s).

En la reología dilatacional se introduce una perturbación sinusoidal a la interfase, inyectando y extrayendo alternativamente líquido de la gota pendiente. A partir del comportamiento oscilatorio de la tensión interfacial ( $\gamma$ ), inducido por la perturbación del área interfacial ( $A$ ), se obtiene el denominado módulo de

elasticidad ( $E$ ), el cual fue definido originalmente por Gibbs (Foedgeding y col., 2006):

$$E = \frac{d\gamma}{d\ln A}$$

Este módulo puede ser considerado como la resistencia total del agente tensoactivo a las deformaciones de la interfase de dilatación, es decir, el estiramiento y la compresión. Este módulo contiene un componente elástico dilatacional ( $E'$ ) y viscoso dilatacional ( $E''$ ), que corresponden a la energía que se recupera y se pierde durante una deformación interfacial.

### **Procedimiento:**

1. Con la ayuda del programa de control y análisis se verificó la calibración del instrumento con agua destilada.
2. Se cargó la muestra: Se colocó un vaso de 40 ml con la muestra en la manguera externa.
3. Con ayuda del programa de control y análisis se mandó a limpiar con la muestra para llenar ambas mangueras con la misma.
4. Se oprimió el ícono “focus” para realizar el enfoque.
5. Para obtener la tensión superficial en el equilibrio, se indicó al equipo que se mantuviera la gota de  $15 \mu l$  durante 11 000 segundos.
6. Para medir reología dilatacional al llegar al equilibrio se realizó un barrido de amplitud de 3.3, 10, 16.7, 23.3, 30, 36.7 %, manteniendo la frecuencia constante.
7. Posteriormente se identificó la zona lineal y se seleccionaron dos amplitudes para realizar el barrido de frecuencias desde 0.01 a 1 Hz.
8. Se graficó la tensión superficial en función del tiempo, así como los módulos (viscoso y elástico) en función de la frecuencia.

## 2.6 Análisis estadístico

Todos las determinaciones se realizaron por triplicado, por lo que, con los valores obtenidos se calculó el promedio ( $\bar{x}$ ), desviación estándar ( $\sigma$ ) y porcentaje de coeficiente de variación (CV, %) para conocer la confiabilidad de los datos y el porcentaje de error.

$$\bar{x} = \frac{\sum n}{n}$$

$$\%CV = \frac{s^2}{\bar{x}} * 100$$

$$\sqrt{\sigma^2} = \frac{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2}}{n - 1}$$

Haciendo uso del programa Minitab 14, se realizó un análisis de varianza para determinar si la concentración de concentrado de suero de leche y goma xantana tuvieron efecto significativo sobre las propiedades estudiadas. Se tomó un nivel de significación ( $\alpha$ ) de 0.05, y se calculó P, del cual se determinó si hubo o no efecto significativo: si se obtiene un valor de P inferior a  $\alpha$ , el efecto resulta estadísticamente significativo.

Además se realizaron dos gráficos, el primero es el correspondiente al efecto de los factores sobre la variable de respuesta, el cual es representado en la Figura 2.17 (A), en éste aparecen además las letras a, b, o c que señalan si existe o no diferencia significativa entre las concentraciones de cada factor de acuerdo a la prueba de Tuckey (en letras iguales, no existe diferencia y en letras diferentes, si existe diferencia significativa). El segundo grafico se muestra en la Figura 2.17 (B), el cual corresponde al efecto de la interacción (estadística) entre los factores sobre la variable de respuesta.

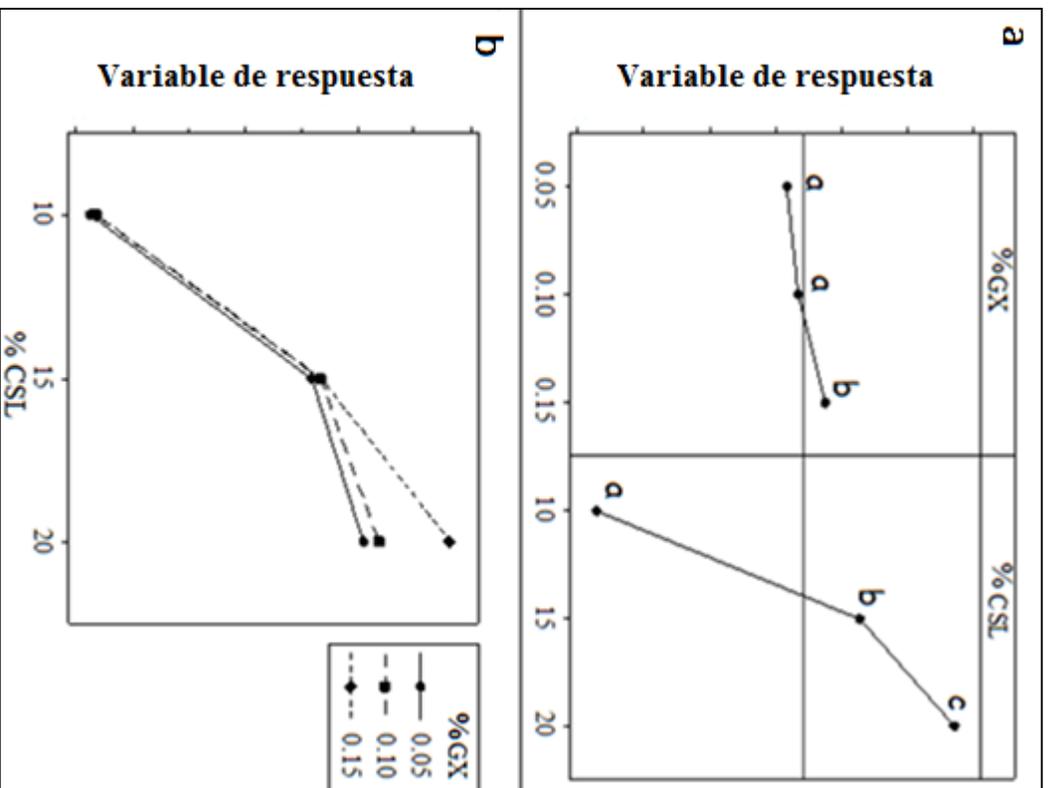


Figura 2.17 Ejemplo de los gráficos del análisis factorial  
 a) efectos individuales b) interacción.

## CAPÍTULO III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Actividad preliminar

#### Determinación del tiempo y velocidad de batido

En el Cuadro 3.1 se muestran los resultados de rendimiento de las espumas obtenidas en la actividad preliminar, la cual se realizó con las concentraciones de 0.05% de goma xantana y 10% de concentrado de suero de leche, se utilizaron las velocidades de cuatro y seis en la batidora planetaria, cada una se mantuvo por 10 y 20 minutos.

Cuadro 3.1. Rendimiento de la espuma que contiene 10% de leche descremada, 0.05 % de goma xantana y 10% de concentrado de suero de leche a distintas velocidades y tiempos de batido.

| Velocidad | Tiempo (min) | Volumen final (ml) | Rendimiento (%) |
|-----------|--------------|--------------------|-----------------|
| 4         | 10           | 2100               | 250             |
|           |              | 2000               | 233             |
| 6         |              | 3000               | 400             |
| 2950      |              | 392                |                 |
| 4         | 20           | 2750               | 358             |
|           |              | 2800               | 367             |
| 6         |              | 3100               | 417             |
| 3300      |              | 450                |                 |

Se realizaron 2 repeticiones por cada velocidad y tiempo, de las cuales se obtuvo un rendimiento medio por cada combinación, éstos se presentan en la Figura 3.1, donde se observa que una mayor velocidad de agitación facilita la dispersión del aire y así la formación de burbujas y un mayor tiempo aumenta el rendimiento sin llegar a afectar la estructura de la espuma. Por lo tanto, se seleccionó la combinación donde

se obtuvo el rendimiento más alto, siendo la velocidad de seis durante un tiempo de 20 minutos.

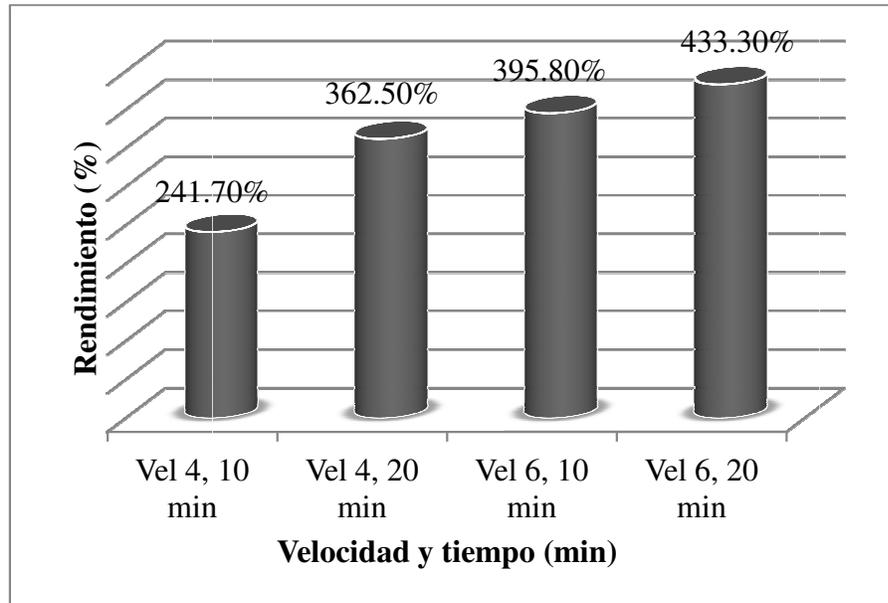


Figura 3.1. Rendimiento promedio de la espuma con 10% de leche descremada, 0.05% de goma xantana, 10% de concentrado de suero de leche a dos distintas velocidades durante 10 y 20 minutos.

## 3.2 Propiedades de la fase continua

### 3.2.1 DENSIDAD RELATIVA

En el Cuadro 3.2 se muestran el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación para cada una de las muestras. Se puede observar que los coeficientes de variación son bajos (menores al 1%) y aceptables debido a que se utilizó un equipo de alta precisión. Además, se aprecia que la densidad relativa aumenta al aumentar la concentración de la goma xantana y del concentrado de suero de leche.

El análisis estadístico proporcionó los valores de P, los cuales resultaron de 0 para la goma xantana y el concentrado de suero de leche, lo cual muestra que ambas macromoléculas tienen efecto significativo sobre la densidad relativa.

Cuadro 3.2 Densidad relativa de la fase continua de cada corrida del diseño experimental.

| corrida | % goma xantana | % concentrado de suero de leche | % leche descremada | Promedio | Desv. Estándar | Coefficiente variación (%) |
|---------|----------------|---------------------------------|--------------------|----------|----------------|----------------------------|
| 1       | 0.05           | 10                              | 10                 | 1.0762   | 0.0001         | 0.01                       |
| 2       | 0.05           | 15                              | 10                 | 1.0959   | 0.0003         | 0.03                       |
| 3       | 0.05           | 20                              | 10                 | 1.1006   | 0.0003         | 0.03                       |
| 4       | 0.1            | 10                              | 10                 | 1.0767   | 0.0002         | 0.02                       |
| 5       | 0.1            | 15                              | 10                 | 1.0966   | 0.0004         | 0.03                       |
| 6       | 0.1            | 20                              | 10                 | 1.1018   | 0.0001         | 0.01                       |
| 7       | 0.15           | 10                              | 10                 | 1.0768   | 0.0002         | 0.02                       |
| 8       | 0.15           | 15                              | 10                 | 1.0967   | 0.0001         | 0.01                       |
| 9       | 0.15           | 20                              | 10                 | 1.1081   | 0.0003         | 0.03                       |
| 10      | 0.05           | 10                              | 10                 | 1.0762   | 0.0000         | 0.00                       |
| 11      | 0.05           | 15                              | 10                 | 1.0960   | 0.0002         | 0.02                       |
| 12      | 0.05           | 20                              | 10                 | 1.1004   | 0.0004         | 0.04                       |
| 13      | 0.1            | 10                              | 10                 | 1.0766   | 0.0003         | 0.03                       |
| 14      | 0.1            | 15                              | 10                 | 1.0967   | 0.0003         | 0.03                       |
| 15      | 0.1            | 20                              | 10                 | 1.1019   | 0.0001         | 0.01                       |
| 16      | 0.15           | 10                              | 10                 | 1.0766   | 0.0001         | 0.01                       |
| 17      | 0.15           | 15                              | 10                 | 1.0967   | 0.0003         | 0.03                       |
| 18      | 0.15           | 20                              | 10                 | 1.1082   | 0.0002         | 0.02                       |

En la Figura 3.2 (a) se observa que el factor que tiene mayor efecto sobre la densidad relativa es el concentrado de suero de leche, ya que la densidad relativa fue diferente para sus tres concentraciones, esto debido a que se agrega mayor cantidad de materia en comparación con la goma xantana. Se aprecia, además que para las concentraciones de 0.05 y 0.10 % de goma xantana los valores de densidad son estadísticamente iguales, lo mismo ocurre con las concentraciones de 0.10 y 0.15 %, sin embargo 0.05 y 0.15 % de goma xantana proporcionaron valores diferentes de densidad relativa.

Para la interacción de concentrado de suero de leche con goma xantana, el valor de P también resulto menor a 0.05, por lo que, como se muestra en la Figura 3.2 (b), la interacción de las macromoléculas tiene efecto estadísticamente significativo sobre la densidad relativa de la fase continua. En la Figura 3.2 (b) se observa que con la concentración de 10 % de concentrado de suero de leche, la goma xantana no tiene efecto; en cambio con la concentración de 20 % de concentrado de suero de leche, el valor de densidad relativa aumenta con la concentración de goma xantana.

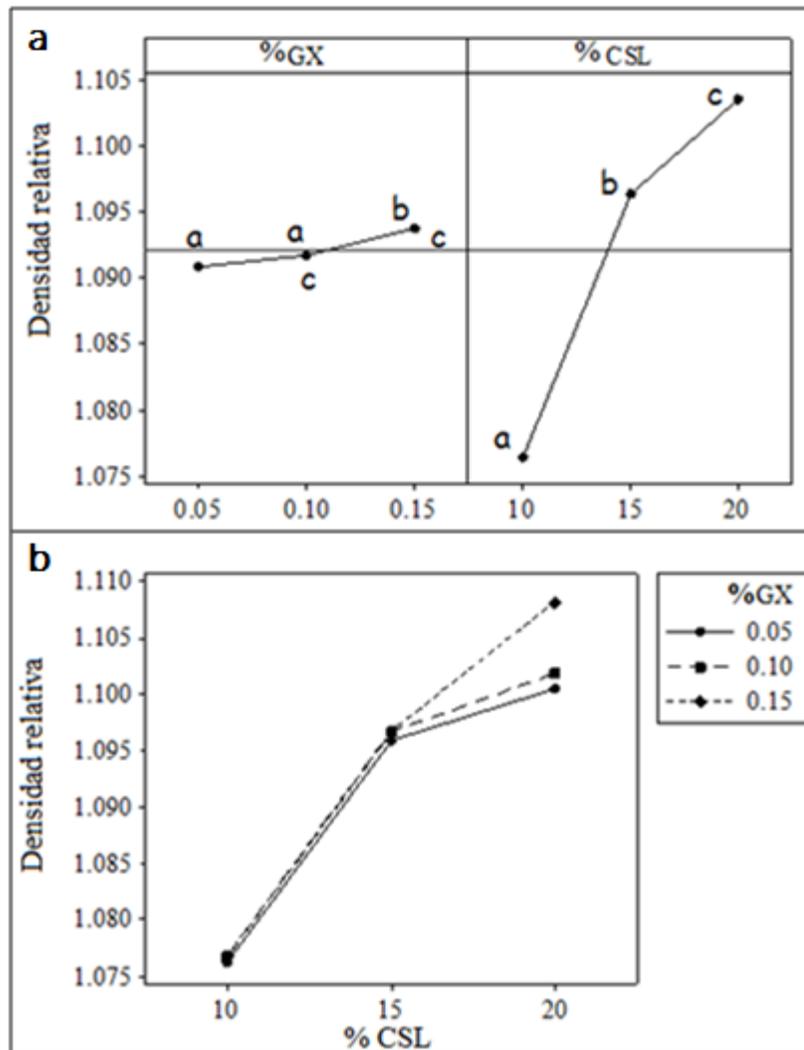


Figura 3.2 Valores medios de la densidad relativa de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

### 3.2.2 pH

Fue importante medir el pH debido a que influye directamente en la adsorción de las proteínas. En las caseínas, cuando se llega al pH del punto isoeléctrico se produce su insolubilización, en cambio las proteínas del suero de leche son solubles en un intervalo de pH muy amplio ya que tienen un mejor balance de aminoácidos, provocando una buena adsorción en la interfase, la cual se da en un intervalo amplio de pH debido a que en la superficie contiene más aminoácidos hidrófilos que hidrófobos (Romero del Castillo y Mestres, 2004). Para la medición de pH se realizaron 10 mediciones por muestra con la finalidad de aumentar la confiabilidad de la medición. En el Cuadro 3.3 se muestran los valores promedio, desviación estándar y coeficiente de variación del pH para cada corrida experimental.

Cuadro 3.3 pH de la fase continua de cada corrida del diseño experimental.

| corrida | % goma xantana | % concentrado de suero de leche | % leche descremada | Promedio | Desv. Estándar | Coficiente variación (%) |
|---------|----------------|---------------------------------|--------------------|----------|----------------|--------------------------|
| 1       | 0.05           | 10                              | 10                 | 6.87     | 0.01           | 0.2                      |
| 2       | 0.05           | 15                              | 10                 | 6.64     | 0.02           | 0.3                      |
| 3       | 0.05           | 20                              | 10                 | 6.47     | 0.02           | 0.3                      |
| 4       | 0.1            | 10                              | 10                 | 6.64     | 0.02           | 0.3                      |
| 5       | 0.1            | 15                              | 10                 | 6.44     | 0.02           | 0.3                      |
| 6       | 0.1            | 20                              | 10                 | 6.29     | 0.04           | 0.6                      |
| 7       | 0.15           | 10                              | 10                 | 6.58     | 0.10           | 1.6                      |
| 8       | 0.15           | 15                              | 10                 | 6.34     | 0.03           | 0.4                      |
| 9       | 0.15           | 20                              | 10                 | 6.21     | 0.05           | 0.8                      |
| 10      | 0.05           | 10                              | 10                 | 6.86     | 0.02           | 0.3                      |
| 11      | 0.05           | 15                              | 10                 | 6.63     | 0.02           | 0.3                      |
| 12      | 0.05           | 20                              | 10                 | 6.47     | 0.02           | 0.3                      |
| 13      | 0.1            | 10                              | 10                 | 6.64     | 0.02           | 0.3                      |
| 14      | 0.1            | 15                              | 10                 | 6.43     | 0.04           | 0.6                      |
| 15      | 0.1            | 20                              | 10                 | 6.29     | 0.05           | 0.8                      |
| 16      | 0.15           | 10                              | 10                 | 6.56     | 0.02           | 0.4                      |
| 17      | 0.15           | 15                              | 10                 | 6.33     | 0.03           | 0.4                      |
| 18      | 0.15           | 20                              | 10                 | 6.22     | 0.02           | 0.3                      |

En general el pH se encuentra entre 6.2 y 6.9; recordando lo mencionado en los antecedentes, cuando el pH es menor al punto isoeléctrico de una proteína, los grupos ionizables están protonados, y la carga neta de la proteína es de signo positivo y cuando el pH es mayor, los grupos ionizables están desprotonados, y la carga neta es de signo negativo (González, 2012). Para una mejor interpretación de los resultados, los valores descritos en los Cuadros 1.5 y 1.6 (punto isoeléctrico de las proteínas involucradas en la fase continua) se colocaron nuevamente en el Cuadro 3.4 anexando en éste la carga que adopta cada una de las proteínas en la fase continua, en el mismo, se observa que la mayoría de las proteínas presentes en la fase continua presentan una carga negativa, por lo que la mezcla de proteínas cargadas negativamente y polisacáridos cargados negativamente promueve la repulsión y evita que existan interacciones proteína-polisacárido de tipo electrostático (Tolstoguzov, 1996).

Cuadro 3.4.- Punto isoeléctrico y carga neta de las proteínas de la fase continua (Badui, 2006; Bylund y Gómez, 2003).

| Proteína                  | Punto isoeléctrico | % de proteína total | Carga neta en la fase continua |
|---------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------|
| $\alpha_{s1}$ - Caseína   | 4.44- 4.476        | 30.6                | Negativa                       |
| $\beta$ - Caseína         | 4.83- 5.07         | 30.8                | Negativa                       |
| $\kappa$ - Caseína        | 5.45- 5.77         | 10.1                | Negativa                       |
| $\beta$ - Lactoglobulina  | 5.13               | 9.8                 | Negativa                       |
| $\alpha$ - Lactoglobulina | 4.2-5.5            | 3.7                 | Negativa                       |
| Albúmina sérica           | 4.7- 4.9           | 1.2                 | Negativa                       |
| Inmunoglobulina G1        | 5.5- 6.8           | 2.1                 | Nula                           |
| Inmunoglobulina G2        | 7.5- 8.3           |                     | Positiva                       |
| Lactoferrina              | 8.81               | < 2.4               | Positiva                       |

Para saber cuál de los factores influye más sobre esta propiedad se realizó el análisis de varianza del cual se obtuvo una P de cero tanto para la goma xantana como para

el concentrado de suero de leche, lo cual indica que ambas macromoléculas tuvieron efecto significativo sobre el pH, en la Figura 3.3 (a), se observa que los dos factores tienen efecto muy similar, ya que las tres concentraciones de ambos proporcionaron valores de pH con diferencias significativas.

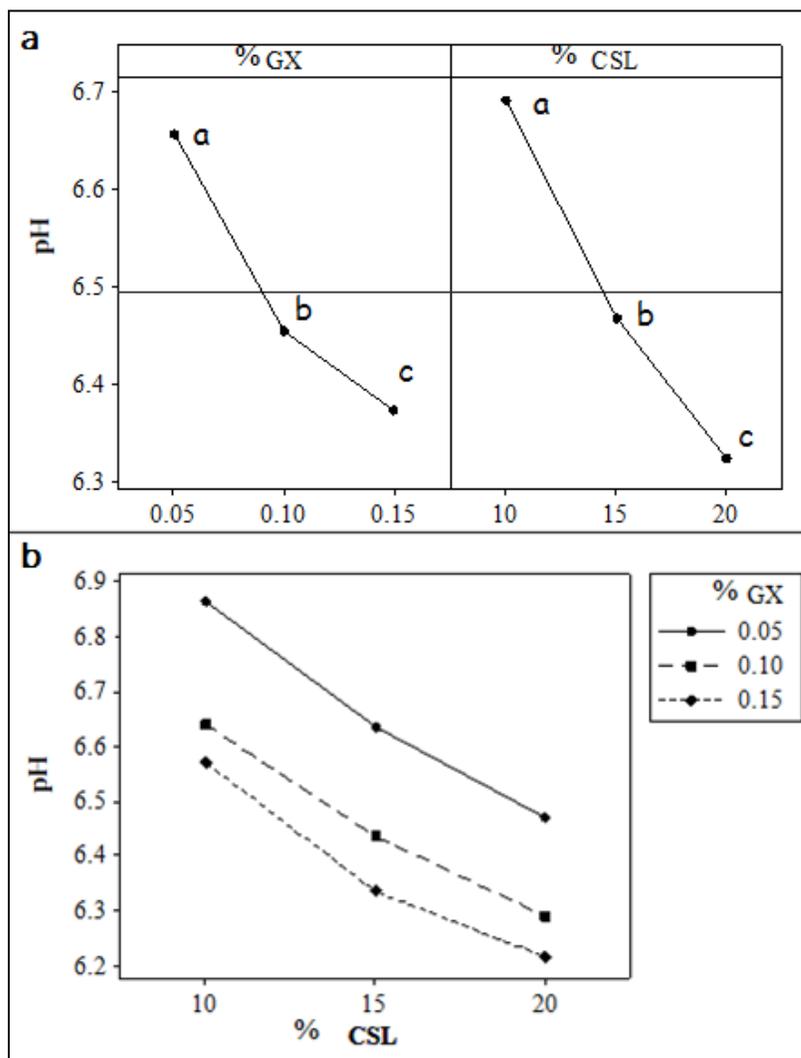


Figura 3.3 Valores medios del pH de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

En la Figura 3.3 (b) se observa que el pH disminuye conforme aumentan las concentraciones de goma xantana y concentrado de suero de leche. El valor de P de la interacción fue de 0.003 por lo que tiene efecto significativo sobre el pH, en la

Figura 3.3 (b) también se observa que con las tres concentraciones del suero de leche la concentración de goma xantana tiene efecto sobre el pH.

### 3.2.3 TAMAÑO DE PARTÍCULA

Esta prueba se realizó inicialmente sin ultrasonido y posteriormente aplicando ultrasonido, esto para comparar los diámetros de partícula y determinar si existía o no la formación de aglomerados del mismo tipo de moléculas o de complejos proteína-polisacárido.

En la Figura 3.4 se muestra un ejemplo del histograma, resultado de la medición sin ultrasonido, la cual presentó varios picos, con uno sobresaliente para todas las muestras, es decir un grupo mayor de partículas con un diámetro alrededor de 110  $\mu\text{m}$ .

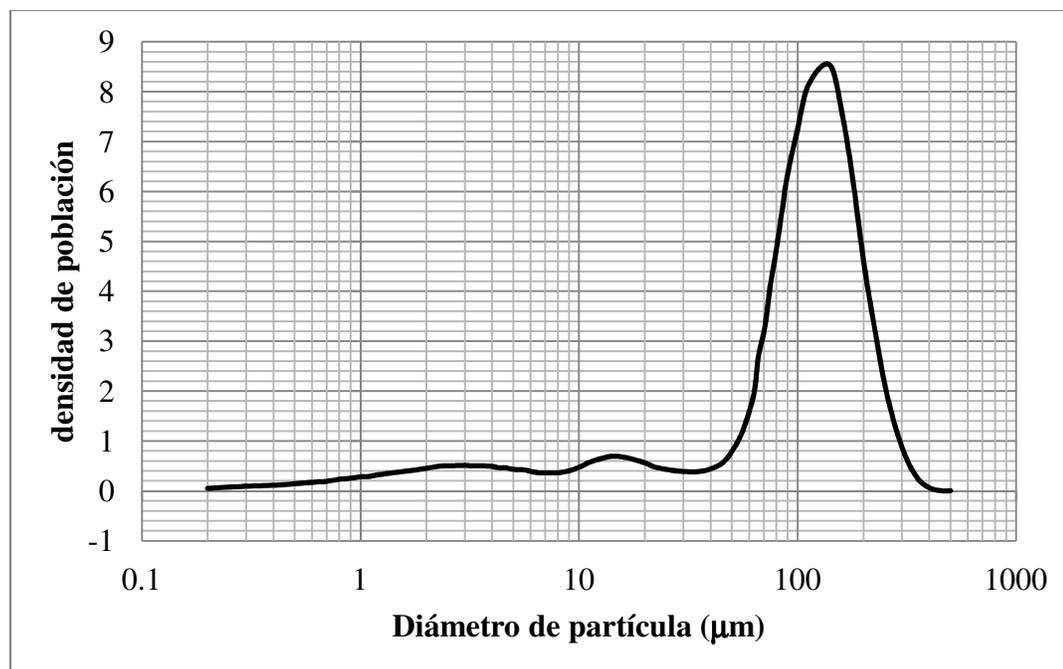


Figura 3.4. Distribución de tamaño de partícula característico de la fase continua con 10% de leche descremada, 10% de concentrado de suero de leche y 0.05% de goma xantana (sin ultrasonido).

En el Cuadro 3.5 se muestran los diámetros medios (sin aplicar ultrasonido) de las partículas de cada muestra. Se observa que los valores de diámetro medio, de las fases continuas, se encuentran entre 107 y 118  $\mu m$ , teniendo un comportamiento muy similar a la leche descremada al 10 % y concentrado de suero de leche al 10 %, los cuales tienen diámetros medios de 107 y 109  $\mu m$  respectivamente; se tienen diámetros de partículas mayores a 100  $\mu m$  probablemente debido a la formación de agregados de micelas de caseínas (las cuales pueden llegar a medir hasta 0.4  $\mu m$ ) que provienen de la leche descremada y seroproteínas como las lactoglobulinas (Bylund y Gómez, 2003). También se observa que el tamaño de partícula de la goma xantana es de alrededor de 3  $\mu m$ .

Cuadro 3.5. Diámetro medio de cada una de las corridas experimentales sin aplicar ultrasonido.

| corrida | % goma xantana | % concentrado suero de leche | % leche descremada | Diámetro Promedio ( $\mu m$ ) | Desv. estándar | Coefficiente variación (%) |
|---------|----------------|------------------------------|--------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| 0       | 0.05           | 0                            | 0                  | 3.6                           | 0.2            | 6.7                        |
| 0       | 0              | 10                           | 0                  | 108.9                         | 0.4            | 0.3                        |
| 0       | 0              | 0                            | 10                 | 107.2                         | 1.0            | 1.0                        |
| 1       | 0.05           | 10                           | 10                 | 107.8                         | 0.7            | 0.7                        |
| 2       | 0.05           | 15                           | 10                 | 107.5                         | 0.7            | 0.6                        |
| 3       | 0.05           | 20                           | 10                 | 110.1                         | 1.6            | 1.4                        |
| 4       | 0.1            | 10                           | 10                 | 110.4                         | 1.8            | 1.6                        |
| 5       | 0.1            | 15                           | 10                 | 107.0                         | 2.4            | 2.2                        |
| 6       | 0.1            | 20                           | 10                 | 108.6                         | 1.8            | 1.6                        |
| 7       | 0.15           | 10                           | 10                 | 118.7                         | 6.7            | 5.6                        |
| 8       | 0.15           | 15                           | 10                 | 117.2                         | 3.5            | 3.0                        |
| 9       | 0.15           | 20                           | 10                 | 110.2                         | 0.2            | 0.2                        |

El análisis estadístico mostró que el concentrado de suero de leche no tuvo efecto significativo sobre el tamaño de partícula sin ultrasonido ( $P=0.149$ ) ya que sin importar la concentración de proteínas, los agregados de las mismas presentan el mismo tamaño. En cambio la goma con  $P=0$  si tuvo efecto significativo,

probablemente debido a las dobles hélices que forma en la fase continua (Cubero y col., 2002).

En la Figura 3.5 (a) se aprecia que sólo la concentración mayor de goma xantana (0.15%) es diferente estadísticamente, debido a que se trata de una molécula de alto peso molecular.

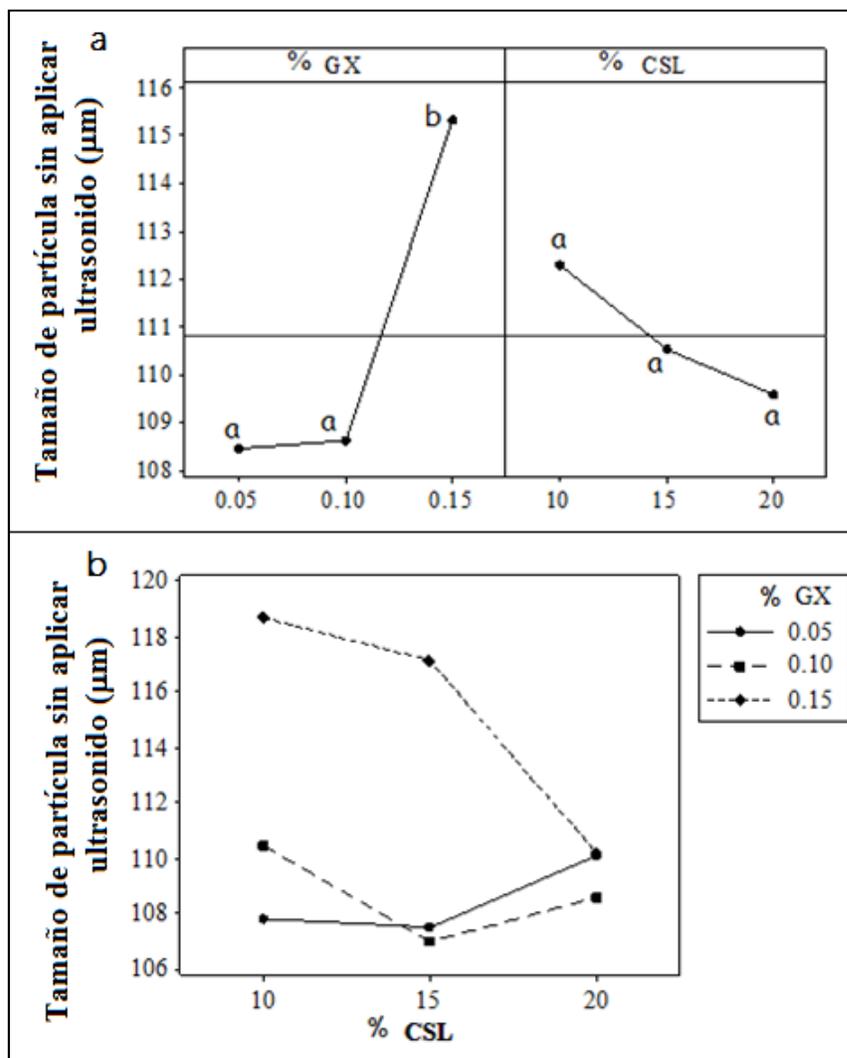


Figura 3.5 Valores medios del diámetro de partícula (sin ultrasonido) de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

En la Figura 3.5 (b) se muestra el comportamiento de la interacción del suero de leche y la goma xantana sobre el tamaño de partícula sin ultrasonido de la fase

continua, la cual según el análisis estadístico tuvo efecto significativo ( $P = 0.023$ ), se observa que no existe una tendencia definida, lo cual se le puede atribuir a los posibles agregados de proteínas, los cuales adquieren tamaños irregulares y heterogéneos. Además se observa que el efecto del concentrado de suero de leche es diferente para las tres concentraciones de goma xantana.

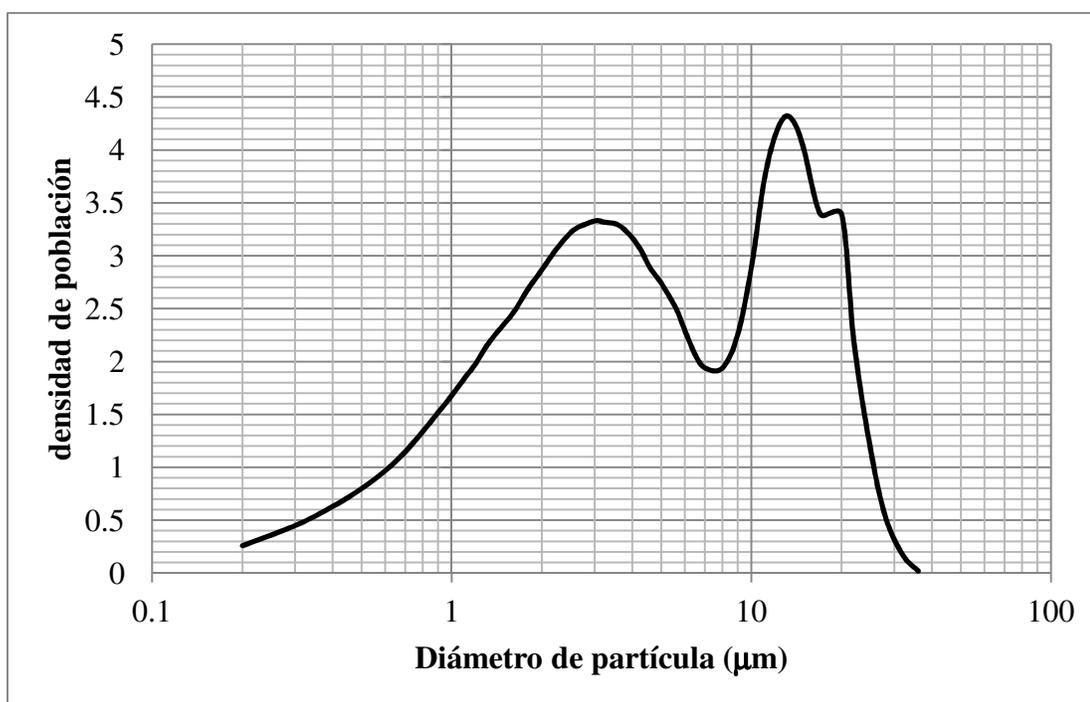


Figura 3.6. Distribución de tamaño de partícula característica de la fase continua con 10% de leche descremada, 10% de concentrado de suero de leche y 0.05% de goma xantana (con ultrasonido).

Posteriormente, en la medición de la distribución del tamaño de partícula utilizando ultrasonido, se obtuvo la curva característica proporcionada para la fase continua (Figura 3.6), en la que se observa un comportamiento bimodal (dos picos), los cuales indican que se tienen dos grupos predominantes de partículas, un grupo tiene tamaños de alrededor de 3 µm, y el segundo alrededor de 11 µm, este comportamiento es más parecido al comportamiento que se obtuvo al aplicar ultrasonido a la leche descremada sola y al concentrado de suero de leche solo, por lo que los picos podrían pertenecer a los distintos tamaños de agregados más

pequeños de proteínas (micelas de caseínas y seroproteínas), los cuales se separaron parcialmente al aplicar ultrasonido, tanto en las fases continuas, como en la leche descremada y concentrado de suero de leche solos.

En el Cuadro 3.6 se muestran los diámetros medios en las fases continuas, al aplicar ultrasonido, así como de la leche descremada, del concentrado de suero de leche y de la goma xantana en forma individual, se observa que el tamaño de partícula tanto de la leche descremada como del concentrado de suero de leche son muy parecidas y se encuentran alrededor de  $5 \mu m$ , muy parecidos a los diámetros medios de las fases continuas; así mismo el tamaño de partícula de la goma xantana se encuentra alrededor de  $3 \mu m$ .

Cuadro 3.6. Diámetro medio de cada una de las corridas experimentales, aplicando ultrasonido.

| Corrida | % goma xantana | % concentrado de suero de leche | % Leche descremada | Diámetro Promedio | Desv. estándar | Coefficiente variación (%) |
|---------|----------------|---------------------------------|--------------------|-------------------|----------------|----------------------------|
| 0       | 0.05           | 0                               | 0                  | 3.7               | 0.3            | 8.6                        |
| 0       | 0              | 10                              | 0                  | 5.0               | 0.1            | 2.0                        |
| 0       | 0              | 0                               | 10                 | 5.1               | 0.5            | 9.1                        |
| 1       | 0.05           | 10                              | 10                 | 6.0               | 0.03           | 0.4                        |
| 2       | 0.05           | 15                              | 10                 | 5.9               | 0.4            | 7.3                        |
| 3       | 0.05           | 20                              | 10                 | 6.0               | 0.1            | 1.5                        |
| 4       | 0.1            | 10                              | 10                 | 5.0               | 0.1            | 2.0                        |
| 5       | 0.1            | 15                              | 10                 | 4.8               | 0.2            | 4.4                        |
| 6       | 0.1            | 20                              | 10                 | 5.5               | 0.1            | 2.1                        |
| 7       | 0.15           | 10                              | 10                 | 5.4               | 0.3            | 4.9                        |
| 8       | 0.15           | 15                              | 10                 | 5.5               | 0.1            | 1.5                        |
| 9       | 0.15           | 20                              | 10                 | 5.8               | 0.1            | 2.2                        |

El análisis estadístico mostró que tanto la goma xantana, como el concentrado de suero de leche tuvieron efecto individual sobre el tamaño de partícula ( $P = 0.00$ ).

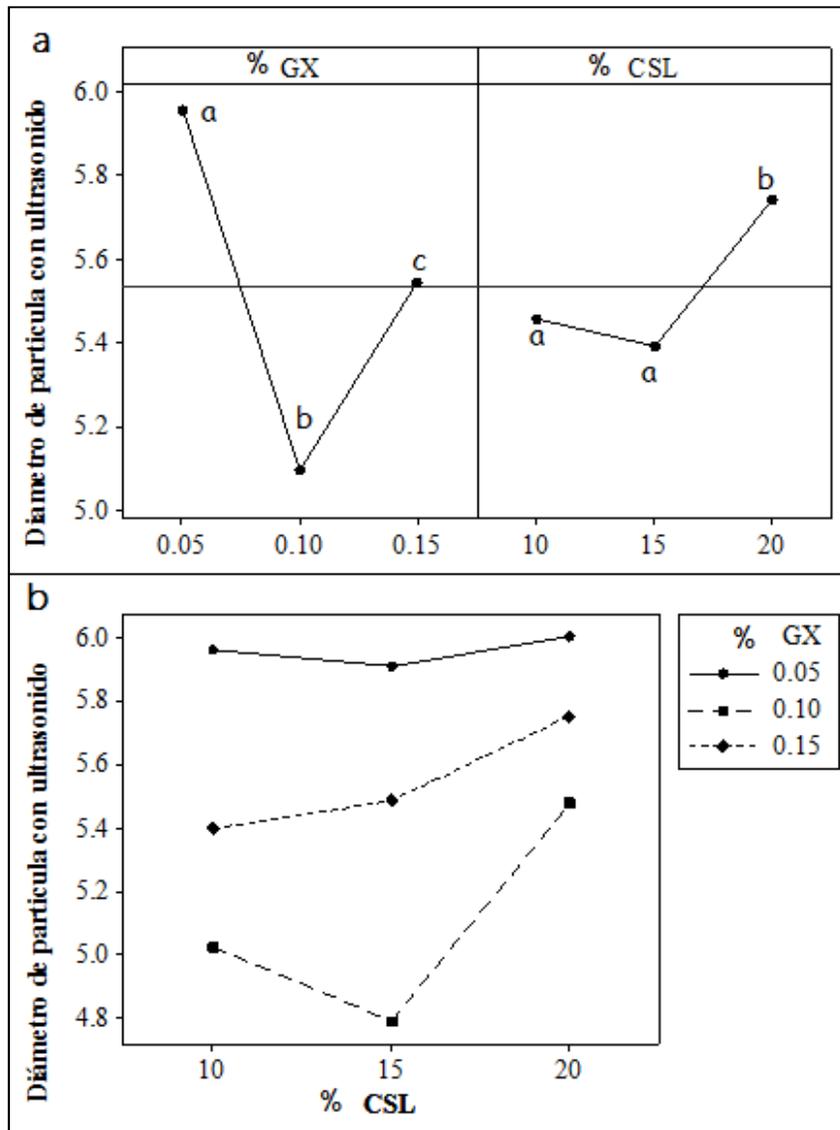


Figura 3.7 Valores medios del diámetro de partícula (con ultrasonido) de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

En la Figura 3.7 (a) se muestra que los diámetros de partícula con las tres concentraciones de goma xantana fueron diferentes, por lo que el mayor efecto sobre el diámetro de partícula al utilizar ultrasonido lo tiene la goma xantana probablemente debido a su alto peso molecular y su conformación, sin embargo no existe una tendencia definida. Para el concentrado de suero de leche los diámetros de partícula correspondientes a las concentraciones de 10 y 15 % son estadísticamente iguales, no así el diámetro correspondiente a la concentración de 20 %.

3.7 (b) se observa una tendencia poco definida del diámetro medio, sin embargo, el análisis estadístico señaló con un valor de  $P = 0.124$  que no existe diferencia significativa.

### 3.2.4 PROPIEDADES DE FLUJO

Como se mencionó en la metodología, en las pruebas de flujo se obtuvieron curvas con 25 puntos de ascenso y 25 puntos de descenso, controlando el esfuerzo de cizalla (Pa) que corresponden a un torque de 0.001 mNm hasta 0.5 mNm.

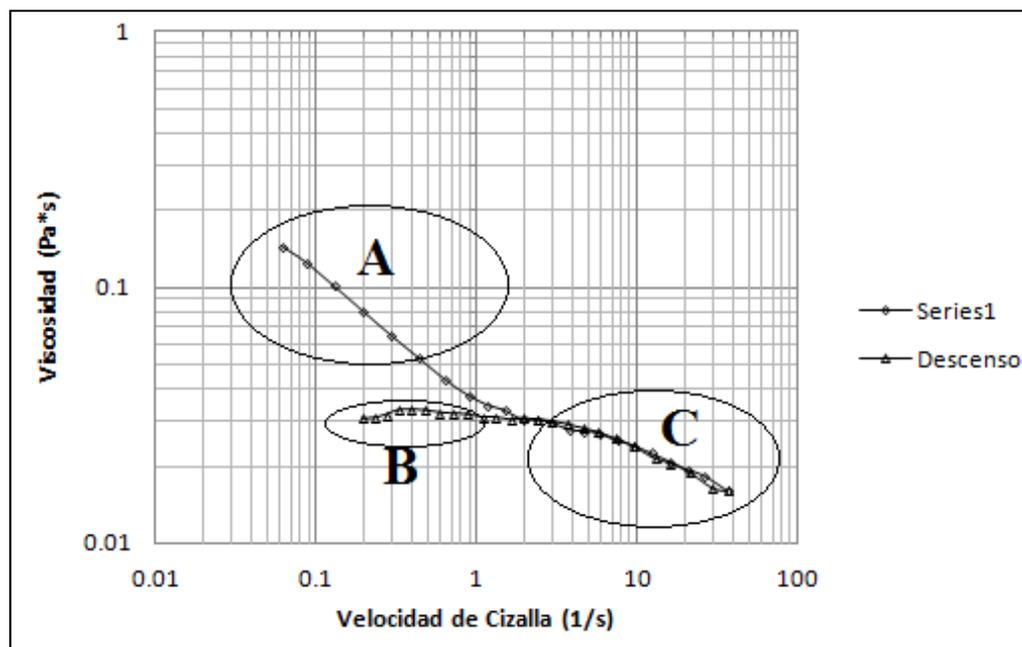


Figura 3.8. Curva de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla de la fase continua con 10% de leche descremada, 0.05% de goma xantana y 10% de suero de leche (zona A: conformación tridimensional, zona B: zona de viscosidad constante, zona C: zona adelgazante a la cizalla).

Se muestra en la Figura 3.8 una curva de viscosidad en función de la velocidad de cizalla, característica de la fase continua con leche descremada, goma xantana y concentrado de suero de leche, donde se puede observar que aproximadamente a partir de la velocidad de cizalla de  $1 \text{ s}^{-1}$ , las curvas de ascenso y descenso se

sobreponen, sin embargo, en los puntos inferiores a éste, las curvas de ascenso y descenso se separan (zona A y B), esto puede ser atribuido a que la goma xantana durante el reposo y hasta una cierta velocidad de cizalla se comporta como un medio sólido debido a su estructura de microgel (dobles hélices) (Cubero y col., 2002), que en el ascenso presentan una red tridimensional (zona A), al aumentar la velocidad de cizalla se tiene un comportamiento adelgazante a la cizalla y las partículas se separan (zona C), al disminuir la velocidad de cizalla nuevamente las partículas sólo se recuperan parcialmente y se llega a una velocidad en donde la viscosidad permanece constante (zona B).

La Figura 3.9 muestra lo que sucede en la estructura en relación con la viscosidad en función de la velocidad de cizalla. Como se puede ver, se tienen tres diferentes zonas (A, B y C) divididas por dos velocidades de cizalla críticas  $\dot{\gamma}^*_{1}$  y  $\dot{\gamma}^*_{2}$ . En la zona A ( $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}^*_{1}$ ) se tiene una red tridimensional, la cual registra mayores valores viscosidad ( $\eta$ ), cuando esto sucede, se debe aplicar una fuerza crítica para que el material fluya. La viscosidad aparente es, en teoría, infinita en la región donde aun no se genera fluidez (Wihdhab, 1995).

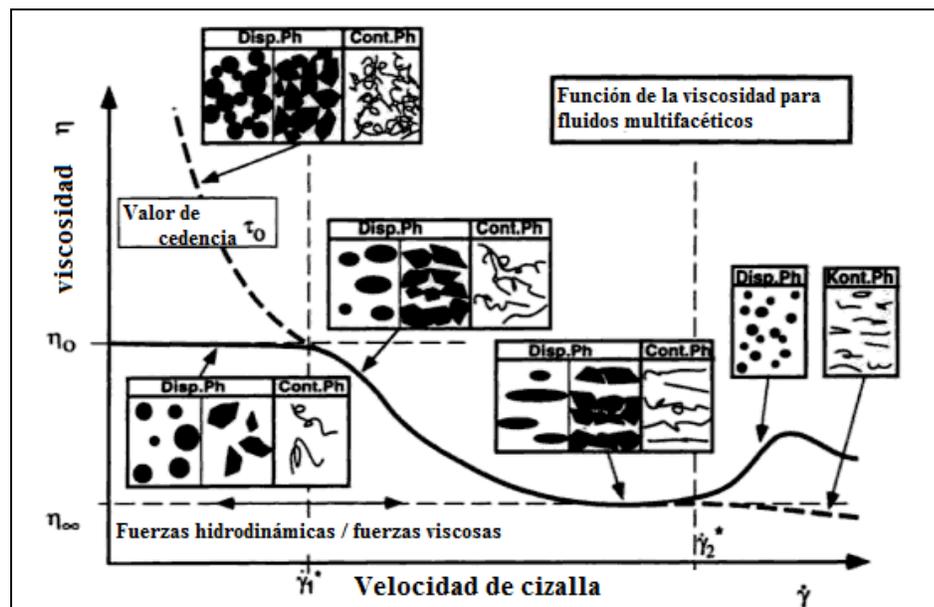


Figura 3.9. Representación de las conformaciones de partículas que se adoptan al aplicar cizalla (Wihdhab, 1995).

En la zona B, las fuerzas hidrodinámicas son del mismo orden de magnitud que las fuerzas estructurales, lo cual induce un cambio en la estructura de acuerdo con el tipo, dirección y tiempo de aplicación de las fuerzas de cizalla. Si el tiempo es largo, se llega a la “estructura de equilibrio”. En muchos fluidos multifacéticos, esta estructura de equilibrio tiene una menor resistencia a fluir que en la zona A, y la viscosidad disminuye conforme aumenta la velocidad de cizalla, a esto se le llama comportamiento fluidificante a la cizalla.

Cuando la segunda velocidad de cizalla crítica es sobrepasada (zona C), la estructura se modifica nuevamente, pudiendo promover que la resistencia a fluir aumente nuevamente o que la estructura se rompa y cause una mayor disminución de la viscosidad

En la Figura 3.10 se muestra la curva de esfuerzo de cizalla, en función de la velocidad de cizalla para la misma muestra de la Figura 3.8.

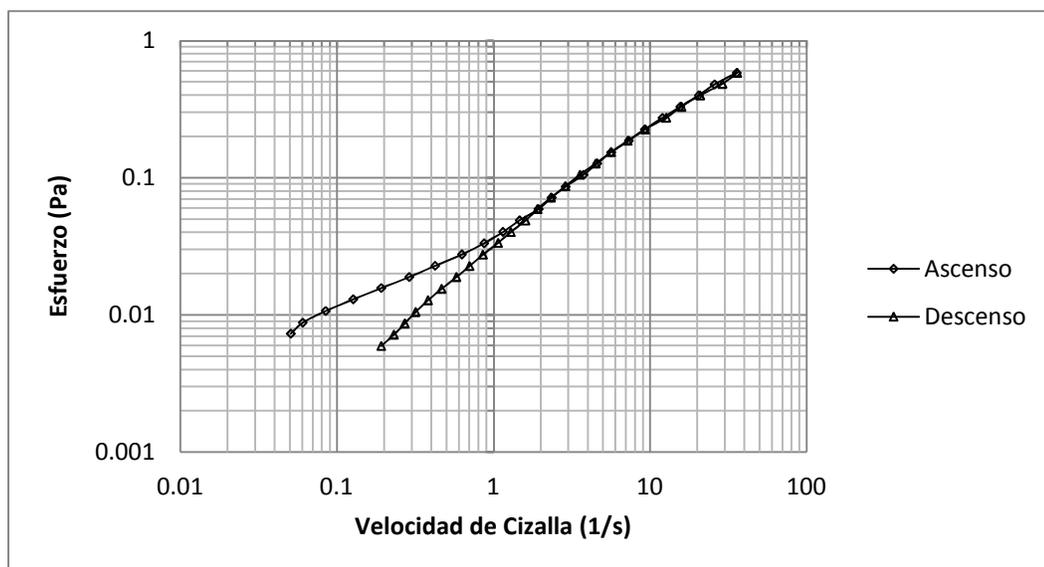


Figura 3.10. Curva de flujo para la fase continua con 10% de leche descremada, 0.05% de goma xantana y 10% de concentrado de suero de leche.

Fue importante realizar ambas curvas ya que en la Figura 3.10 se observa claramente el comportamiento adelgazante a la cizalla, y con la misma, se obtuvieron los parámetros reológicos.

Las curvas de descenso fueron elegidas para el tratamiento estadístico, ya que éstas presentaron un mejor ajuste. En la Figura 3.11 se muestran las curvas de descenso de los experimentos 1, 2 y 3, y de la dispersión de goma xantana al 0.05%, ya que son en las cuales se logró identificar la zona de viscosidad inicial constante por lo que se ajustaron al modelo de Carreau considerando  $\eta_{\infty} = 0$  :

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

Donde:  $\eta_0$  = viscosidad inicial (Pa.s),  $\eta_{\infty}$  = viscosidad infinita (Pa.s),  $t_c$  = tiempo característico (s),  $p$  = exponente de Carreau, del cual se obtiene el índice de comportamiento al flujo:  $n = 1 - p$

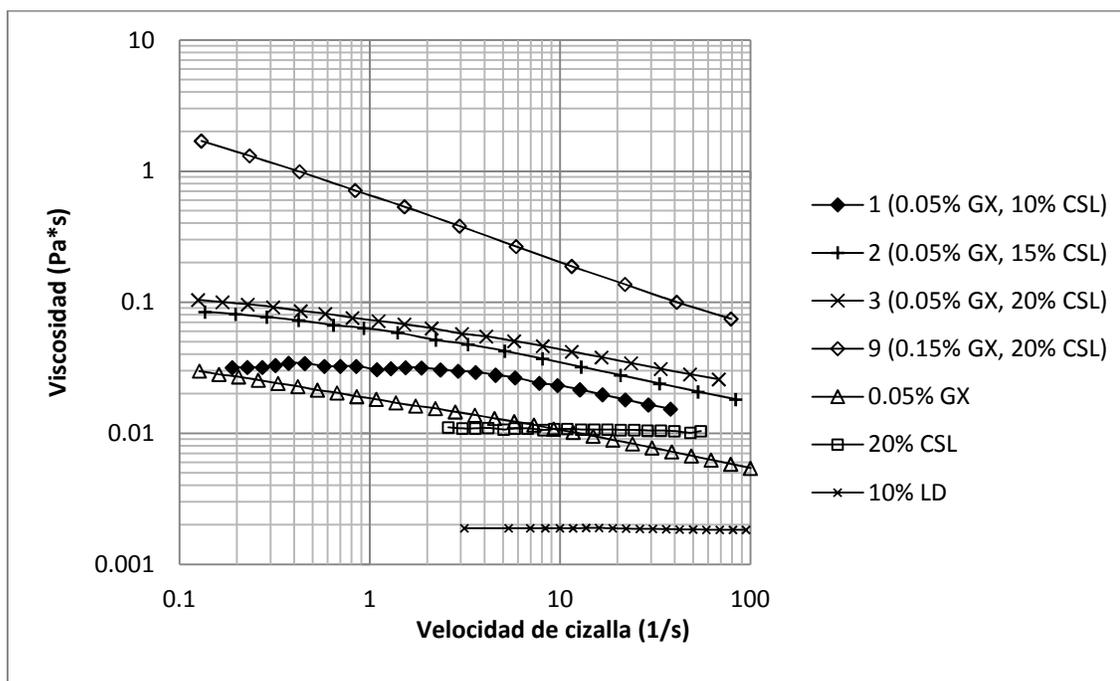


Figura 3.11. Curvas de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla correspondiente a la curva de descenso, de las fases continuas 1, 2, 3, 9 (con 10% de leche descremada), goma xantana al 0.05%, leche descremada al 10% y concentrado de suero de leche al 20% (GX- goma xantana, CSL- concentrado de suero de leche, LD- leche descremada).

En la Figura 3.11 también se muestran las curvas de concentrado de suero de leche al 20% y leche descremada al 10%, las cuales presentaron la viscosidad más baja de

todos los sistemas estudiados y un comportamiento newtoniano. Además se muestra la curva de la fase continua 9, la cual alcanzó la mayor viscosidad a menor velocidad de cizalla.

En la Figura 3.12 se muestran las curvas de las fases continuas con 0.10 % y 0.15 % de goma xantana (modelo de la potencia), además de curvas de fases continuas de goma xantana al 0.15% y de leche descremada al 10 %, para efectos de comparación.

Las fases continuas con 0.1% y 0.15% de goma xantana, se ajustaron al modelo de la potencia, definido como:  $\sigma = K\dot{\gamma}^n$

Donde:  $n$  = índice de comportamiento,  $K$  = índice de consistencia ( $Pa \cdot s^n$ )

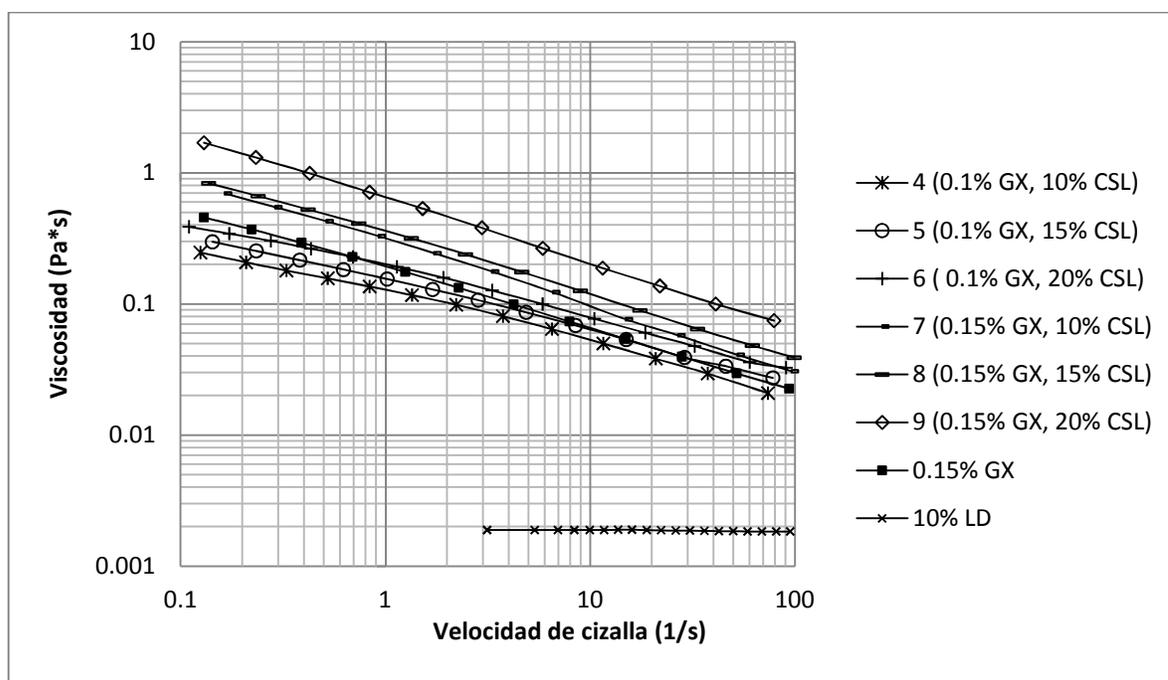


Figura 3.12. Curvas de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla correspondiente a la curva de descenso, de las fases continuas 4, 5, 6, 7, 8, 9 (con 10% de leche descremada), goma xantana al 0.15 y 0.05%, y leche descremada al 10% (GX- goma xantana, CSL- concentrado de suero de leche, LD- leche descremada).

En las Figuras 3. 11 y 3.12 se observa que las fases continuas de estudio presentaron un comportamiento característico de materiales adelgazantes a la cizalla, más cercano al comportamiento de la goma xantana (modelo de Carreau) que al del concentrado de suero de leche o de la leche descremada (modelo newtoniano).

En la Figura 3.13 se muestra la curva de descenso de la fase continua con 10% de leche descremada, 0.05% de goma xantana y 10% de concentrado de suero de leche, ajustada al modelo de Carreau, donde los valores de  $R$  fueron mayores a 0.99, lo que reafirma el ajuste.

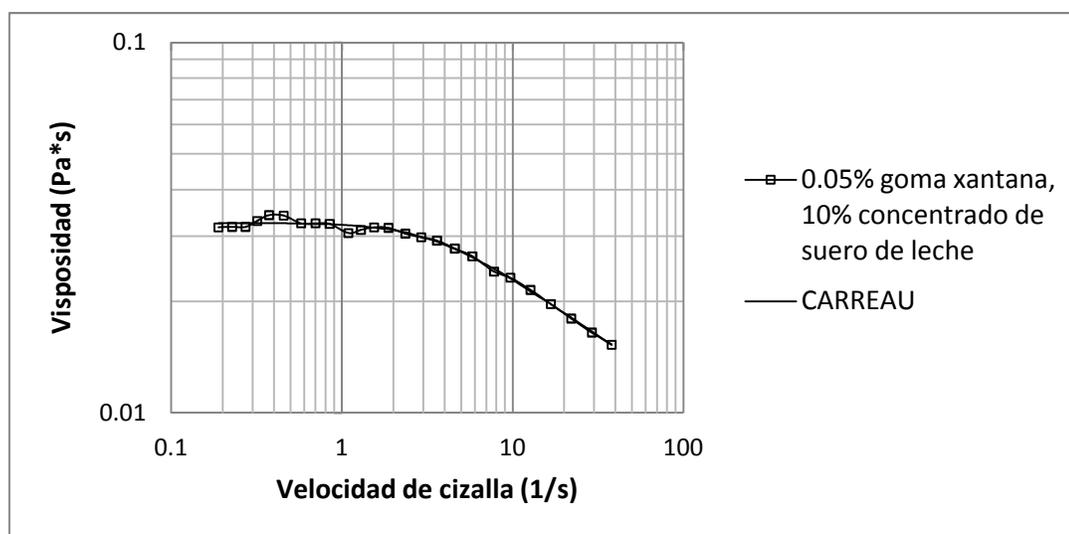


Figura 3.13. Ajuste de la curva de flujo de descenso de la fase continua 1 (leche descremada 10%, goma xantana 0.05% y concentrado de suero de leche 10%) al modelo de Carreau.

Al ajustar las curvas mencionadas de la Figura 3.11 al modelo de Carreau en el intervalo de 0.1 a 100 (1/s) de velocidad de cizalla, se calculó la viscosidad inicial ( $\eta_0$ ) en Pa.s (Cuadro 3.7), el tiempo característico ( $t_c$ ) en segundos (Cuadro 3.8) y el exponente de Carreau ( $p$ ) (Cuadro 3.9), además de su desviación estándar y porcentaje de coeficiente de variación.

En el Cuadro 3.7 se observa que los valores de viscosidad inicial aumentan al incrementar la concentración de concentrado de suero de leche, lo que indica que está actuando también como espesante de la fase continua.

Cuadro 3.7 Viscosidad inicial ( $\eta_0$ ) del modelo de Carreau para las fases continuas con 0.05% de goma xantana ( $0.1 - 100s^{-1}$ ).

| corrida | % goma xantana | % concentrado de suero de leche | % leche descremada | $\eta_0$ Promedio (Pa.s) | Desv. Estándar | Coefficiente variación (%) |
|---------|----------------|---------------------------------|--------------------|--------------------------|----------------|----------------------------|
| 0       | 0.15           | 0                               | 0                  | 1.507                    | 0.076          | 5                          |
| 0       | 0.15           | 0                               | 10                 | 1.613                    | 0.119          | 7                          |
| 1       | 0.05           | 10                              | 10                 | 0.032                    | 0.001          | 2                          |
| 2       | 0.05           | 15                              | 10                 | 0.087                    | 0.002          | 2                          |
| 3       | 0.05           | 20                              | 10                 | 0.125                    | 0.006          | 4                          |
| 10      | 0.05           | 10                              | 10                 | 0.033                    | 0.001          | 3                          |
| 11      | 0.05           | 15                              | 10                 | 0.094                    | 0.003          | 3                          |
| 12      | 0.05           | 20                              | 10                 | 0.128                    | 0.002          | 2                          |

Cuadro 3.8 Tiempo característico ( $t_c$ ) del modelo de Carreau de las fases continuas con 0.05% de goma xantana ( $0.1 - 100s^{-1}$ ).

| corrida | % goma xantana | % concentrado de suero de leche | % leche descremada | $t_c$ Promedio (s) | Desv. estándar | Coefficiente variación (%) |
|---------|----------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------------------|
| 0       | 0.15           | 0                               | 0                  | 21.5               | 1.0            | 5                          |
| 0       | 0.15           | 0                               | 10                 | 12.1               | 0.8            | 7                          |
| 1       | 0.05           | 10                              | 10                 | 0.3                | 0.0            | 2                          |
| 2       | 0.05           | 15                              | 10                 | 3.0                | 0.2            | 6                          |
| 3       | 0.05           | 20                              | 10                 | 6.0                | 0.1            | 2                          |
| 10      | 0.05           | 10                              | 10                 | 0.3                | 0.0            | 6                          |
| 11      | 0.05           | 15                              | 10                 | 3.3                | 0.1            | 3                          |
| 12      | 0.05           | 20                              | 10                 | 8.2                | 0.2            | 3                          |

Posteriormente en el Cuadro 3.8 se observa que al aumentar la concentración de concentrado de suero de leche el tiempo característico ( $t_c$ ) aumenta significativamente, éste representa el tiempo que tarda el fluido en comenzar a disminuir su viscosidad, es decir el inverso de la velocidad de cizalla en la que inició la zona fluidificante (Shenoy, 1999); por lo que se observa que el concentrado de suero de leche influye de manera individual sobre la resistencia que opone la fase continua a fluir. Finalmente en el Cuadro 3.9 se muestran los valores del exponente  $p$ , así como el índice de comportamiento al flujo el cual se obtuvo con la ecuación  $n = 1 - p$  (Paar Physica, 2006).

Cuadro 3.9 Exponente de Carreau ( $p$ ) e índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) de las fases continuas con 0.05% de goma xantana (0.1 - 100s<sup>-1</sup>).

| corrida | % goma xantana | % concentrado de suero de leche | % leche descremada | $p$ promedio | Desv. Estándar | Coefficiente variación (%) | $n$ promedio |
|---------|----------------|---------------------------------|--------------------|--------------|----------------|----------------------------|--------------|
| 0       | 0.15           | 0                               | 0                  | 0.267        | 0.003          | 1                          | 0.73         |
| 0       | 0.15           | 0                               | 10                 | 0.286        | 0.001          | 1                          | 0.71         |
| 1       | 0.05           | 10                              | 10                 | 0.159        | 0.002          | 1                          | 0.84         |
| 2       | 0.05           | 15                              | 10                 | 0.141        | 0.003          | 2                          | 0.86         |
| 3       | 0.05           | 20                              | 10                 | 0.138        | 0.004          | 3                          | 0.86         |
| 10      | 0.05           | 10                              | 10                 | 0.153        | 0.011          | 7                          | 0.85         |
| 11      | 0.05           | 15                              | 10                 | 0.127        | 0.005          | 4                          | 0.87         |
| 12      | 0.05           | 20                              | 10                 | 0.123        | 0.001          | 1                          | 0.88         |

El índice de comportamiento no presentó una tendencia definida, sin embargo mostró valores cercanos al de la disolución de xantana a la misma concentración, los cuales indican un comportamiento adelgazante a la cizalla.

En las curvas restantes (concentración de 0.1% y 0.15% de goma xantana) sólo se detectó la zona adelgazante a la cizalla por lo que fueron ajustadas al modelo reológico de la potencia como se muestra en la Figura 3.14

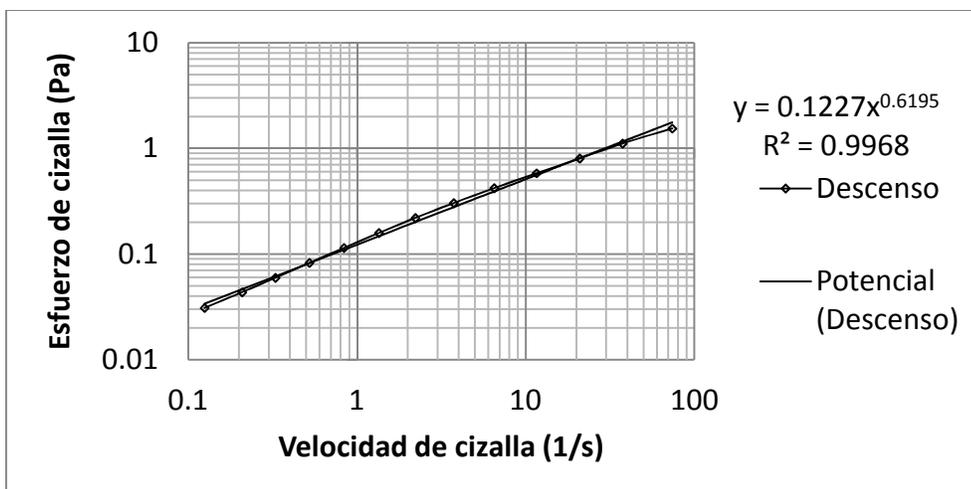


Figura 3.14. Ajuste de la curva de flujo de descenso de la fase continua 4 (leche descremada 10%, goma xantana 0.1% y concentrado de suero de leche 10%) al modelo de la potencia.

El valor de  $R^2$  fue mayor a 0.99 lo que se considera un buen ajuste a este modelo. Se calcularon los parámetros reológicos correspondientes para cada uno de los experimentos, para poder comparar los parámetros de todas las concentraciones, a la curvas de 0,05% de goma xantana se les ajustó al modelo de la potencia a partir de la zona en que la viscosidad comienza a disminuir, el índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) e índice de consistencia ( $K$ ), se muestran a continuación en los Cuadros 3.10 y 3.11 respectivamente.

En el Cuadro 3.10 se confirma que los valores del índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) son confiables, ya que tienen un porcentaje de coeficiente de variación menor a ocho. El análisis estadístico señaló que la goma xantana ( $P = 0$ ) tuvo mayor efecto que el concentrado de suero de leche ( $P = 0.046$ ) sobre el índice de comportamiento al flujo, lo cual se puede confirmar en la Figura 3.15 (a), donde se observa que las tres concentraciones de goma xantana proporcionaron valores diferentes de índice de comportamiento al flujo, en cambio para las concentraciones de suero de leche, los valores de  $n$  son iguales, esto debido a que la goma xantana tiene un comportamiento fluidificante a la cizalla, a diferencia del concentrado que se comporta como un fluido newtoniano.

Cuadro 3.10 Índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) de la fase continua de cada corrida del diseño experimental ( $0.1 - 100s^{-1}$ ).

| corrida | % goma xantana | % concentrado de suero de leche | % leche descremada | $n$ promedio | Desv. estándar | Coefficiente variación (%) |
|---------|----------------|---------------------------------|--------------------|--------------|----------------|----------------------------|
| 0       | 0.05           | 0                               | 0                  | 0.75         | 0.001          | 0.1                        |
| 0       | 0.15           | 0                               | 0                  | 0.57         | 0.002          | 0.4                        |
| 1       | 0.05           | 10                              | 10                 | 0.74         | 0.002          | 0                          |
| 2       | 0.05           | 15                              | 10                 | 0.71         | 0.002          | 0                          |
| 3       | 0.05           | 20                              | 10                 | 0.71         | 0.007          | 1                          |
| 4       | 0.1            | 10                              | 10                 | 0.63         | 0.021          | 3                          |
| 5       | 0.1            | 15                              | 10                 | 0.62         | 0.001          | 0                          |
| 6       | 0.1            | 20                              | 10                 | 0.62         | 0.001          | 0                          |
| 7       | 0.15           | 10                              | 10                 | 0.50         | 0.001          | 0                          |
| 8       | 0.15           | 15                              | 10                 | 0.52         | 0.004          | 1                          |
| 9       | 0.15           | 20                              | 10                 | 0.51         | 0.002          | 0                          |
| 10      | 0.05           | 10                              | 10                 | 0.75         | 0.003          | 0                          |
| 11      | 0.05           | 15                              | 10                 | 0.72         | 0.006          | 1                          |
| 12      | 0.05           | 20                              | 10                 | 0.73         | 0.002          | 0                          |
| 13      | 0.1            | 10                              | 10                 | 0.62         | 0.049          | 7                          |
| 14      | 0.1            | 15                              | 10                 | 0.62         | 0.001          | 0                          |
| 15      | 0.1            | 20                              | 10                 | 0.60         | 0.027          | 5                          |
| 16      | 0.15           | 10                              | 10                 | 0.51         | 0.003          | 1                          |
| 17      | 0.15           | 15                              | 10                 | 0.51         | 0.029          | 6                          |
| 18      | 0.15           | 20                              | 10                 | 0.51         | 0.005          | 1                          |

En la Figura 3.15 (b), se muestra que los valores de índice de comportamiento al flujo corresponden a fluidos adelgazantes a la cizalla. Se encontraron diferencias significativas en el índice de comportamiento al flujo ( $P = 0.046$ ), por efecto de la interacción de la goma xantana con el concentrado de suero de leche. Se observa además que con las concentraciones de 0.10 y 0.15 % de goma xantana el índice de comportamiento al flujo disminuye al aumentar la concentración de suero de leche, en cambio con la concentración de 0.05 % de goma xantana el índice de

comportamiento al flujo aumenta ligeramente al aumentar la concentración de suero de leche de 15 a 20 %.

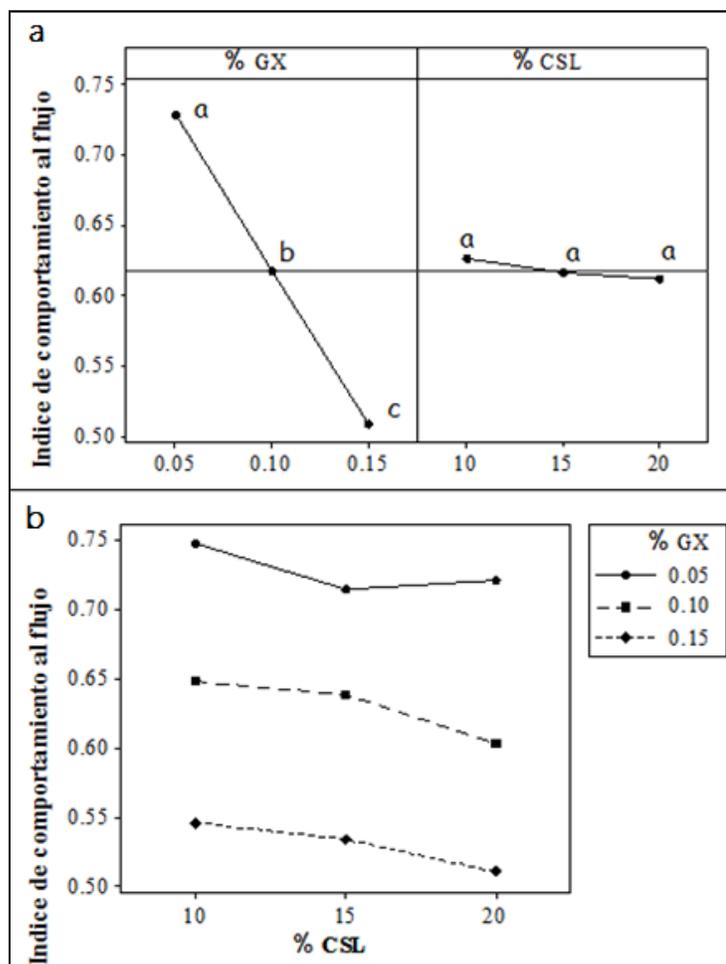


Figura 3.15 Valores medios del índice de comportamiento al flujo de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

En el Cuadro 3.11 se muestran los valores de índice de consistencia. Se puede observar que a excepción de las corridas 1 y 15, los valores son confiables por tener un coeficiente de variación menor a 10, probablemente debido a la presencia de alguna burbuja o una mala homogenización durante la medición.

Cuadro 3.11 Índice de consistencia  $K$  ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ) de la fase continua de cada corrida del diseño experimental ( $0.1 - 100\text{s}^{-1}$ ).

| Corrida | % goma xantana | % concentrado de suero de leche | % leche descremada | $K$ ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ) promedio | Desviación estándar | Coefficiente variación (%) |
|---------|----------------|---------------------------------|--------------------|---|---------------------|----------------------------|
| 0       | 0.05           | 0                               | 0                  | 0.019                                       | 0.001               | 3                          |
| 0       | 0.15           | 0                               | 0                  | 0.174                                       | 0.001               | 1                          |
| 1       | 0.05           | 10                              | 10                 | 0.041                                       | 0.006               | 16                         |
| 2       | 0.05           | 15                              | 10                 | 0.067                                       | 0.001               | 1                          |
| 3       | 0.05           | 20                              | 10                 | 0.088                                       | 0.004               | 4                          |
| 4       | 0.1            | 10                              | 10                 | 0.117                                       | 0.009               | 8                          |
| 5       | 0.1            | 15                              | 10                 | 0.152                                       | 0.001               | 1                          |
| 6       | 0.1            | 20                              | 10                 | 0.184                                       | 0.003               | 2                          |
| 7       | 0.15           | 10                              | 10                 | 0.309                                       | 0.005               | 2                          |
| 8       | 0.15           | 15                              | 10                 | 0.357                                       | 0.010               | 3                          |
| 9       | 0.15           | 20                              | 10                 | 0.641                                       | 0.011               | 2                          |
| 10      | 0.05           | 10                              | 10                 | 0.040                                       | 0.000               | 1                          |
| 11      | 0.05           | 15                              | 10                 | 0.059                                       | 0.002               | 3                          |
| 12      | 0.05           | 20                              | 10                 | 0.081                                       | 0.001               | 2                          |
| 13      | 0.1            | 10                              | 10                 | 0.127                                       | 0.009               | 8                          |
| 14      | 0.1            | 15                              | 10                 | 0.156                                       | 0.001               | 1                          |
| 15      | 0.1            | 20                              | 10                 | 0.209                                       | 0.029               | 14                         |
| 16      | 0.15           | 10                              | 10                 | 0.335                                       | 0.017               | 5                          |
| 17      | 0.15           | 15                              | 10                 | 0.348                                       | 0.016               | 4                          |
| 18      | 0.15           | 20                              | 10                 | 0.604                                       | 0.023               | 4                          |

En el Cuadro 3.11 también se puede observar que al aumentar la concentración de goma xantana la consistencia de la fase continua aumenta, llegando hasta valores de alrededor de  $0.6 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$  al tener concentración de  $0.15\%$  de goma xantana. Del análisis estadístico se obtuvieron valores de  $P = 0$ , tanto para la goma xantana, como para el concentrado de suero de leche, y como se muestra en la Figura 3.16 (a), la concentración de goma xantana es la que mayor efecto tiene sobre el índice de consistencia debido, a sus propiedades espesantes gracias a sus doble hélices (Cubero y col., 2002).

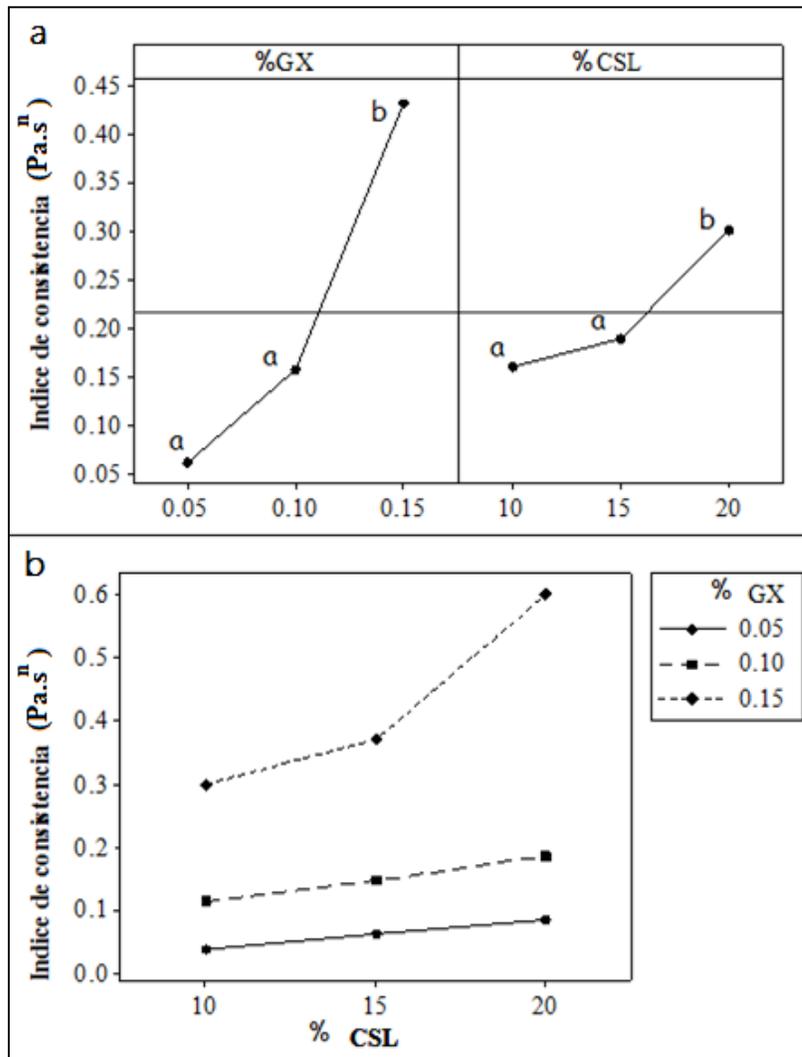


Figura 3.16 Valores medios del índice de consistencia de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

En la Figura 3.16 (a) también se observa que el índice de consistencia es igual para las concentraciones de 0.05 y 0.10 % de goma xantana, así como para las concentraciones de 10 y 15 % de concentrado de suero de leche, sin embargo con las concentraciones mayores de ambas (0.15 % de goma xantana y 20 % de concentrado de suero de leche) resultaron diferentes, por lo que es con estas concentraciones con las que se tiene un aumento significativo en la consistencia de la fase continua.

De la misma forma que con el índice de comportamiento al flujo el análisis estadístico mostró un valor de P menor a 0.05 para la interacción de las

macromoléculas por lo que se observó que si existe diferencia entre los valores obtenidos. En la Figura 3.16 (b) se observa que con 0.15 % de goma xantana el efecto del concentrado de suero de leche es más notorio, por lo que la fase continua con 0.15 % de goma xantana y 20 % de concentrado de suero de leche tiene la mayor consistencia, por lo que a pesar de no haber interacción de tipo electrostática, al mezclar la goma xantana con el concentrado de suero de leche la consistencia de la fase continua aumenta considerablemente.

### 3.3 Propiedades de la espuma

#### 3.3.1 RENDIMIENTO

Se calculó el rendimiento en cada una de las muestras utilizando la ecuación 2.7, los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 3.12.

Cuadro 3.12. Rendimiento de las espumas formadas con fase continua con cada una de las concentraciones de goma xantana y concentrado de suero de leche.

| Goma xantana (%) | Concentrado suero de leche (%) | Leche descremada (%) | Rendimiento promedio (%) | Desv. Estándar | Coef. variación (%) |
|------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------|----------------|---------------------|
| 0.05             | 10                             | 10                   | 450                      | 26             | 5.7                 |
| 0.05             | 15                             | 10                   | 537                      | 13             | 2.4                 |
| 0.05             | 20                             | 10                   | 596                      | 13             | 2.2                 |
| 0.1              | 10                             | 10                   | 485                      | 13             | 2.6                 |
| 0.1              | 15                             | 10                   | 559                      | 13             | 2.3                 |
| 0.1              | 20                             | 10                   | 670                      | 26             | 3.8                 |
| 0.15             | 10                             | 10                   | 537                      | 26             | 4.8                 |
| 0.15             | 15                             | 10                   | 581                      | 26             | 4.4                 |
| 0.15             | 20                             | 10                   | 641                      | 13             | 2                   |

En el Cuadro 3.12 se aprecia que los valores son confiables debido a los porcentajes de coeficiente de variación menores a 5 %.

En la Figura 3.17 (a) se observa que el rendimiento se ve determinado por el concentrado de suero de leche, ya que los tres valores de rendimiento dados por las tres concentraciones de suero de leche son diferentes, esto ya que las proteínas del suero de leche han sido reportadas por exhibir propiedades espumantes, por su alta hidrofobicidad (Bylund y Gómez, 2003).

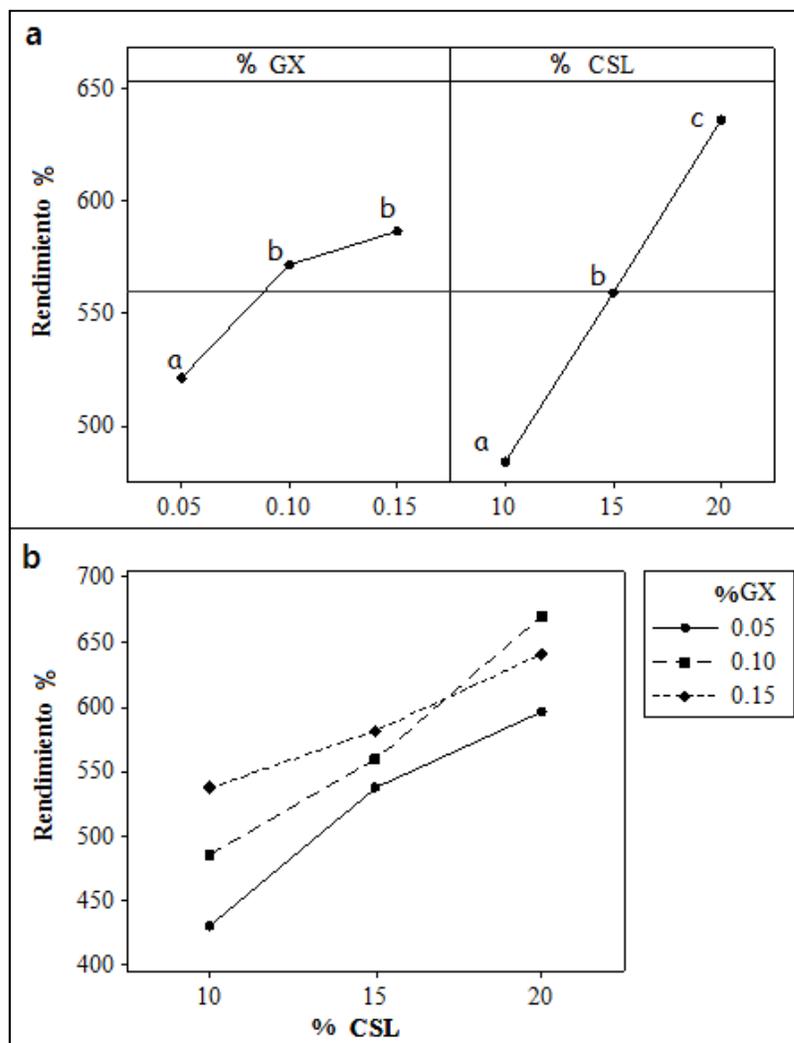


Figura 3.17 Valores medios de rendimiento de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

Además el rendimiento es favorecido por la adición de goma xantana ya que aumenta de forma significativa de 0.05 a 0.10 %, por lo que el análisis estadístico señaló que existen diferencias significativas entre los valores de rendimiento por

efecto de la concentración de ambas macromoléculas, así como de la mezcla de las mismas ( $P = 0$ ). En la Figura 3.17 (b) se muestra el incremento en el rendimiento por la interacción del concentrado de suero de leche con goma xantana. Es importante mencionar que el mayor rendimiento lo proporcionó la fase continua con 0.1% de goma xantana y 20% de concentrado de suero de leche, y no con la concentración de 0.15% de goma xantana. Además, a esa concentración de xantana, la pendiente de la curva de tendencia, es menor. Este resultado pudiera explicarse, por la alta consistencia desarrollada en el sistema con 20% de concentrado y 0.15% de xantana, que reduce la movilidad de las proteínas, las cuales captan el aire y rodean la superficie de la burbuja, provocando una disminución del rendimiento (Narchi y col., 2009).

### **3.3.2 DIÁMETRO DE BURBUJA**

Para la medición del diámetro de burbuja se tomaron fotos con ayuda del microscopio óptico inmediatamente después del batido y transcurrida una hora. En el Cuadro 3.13 se muestran los promedios de diámetros de burbuja en micrómetros con un nivel de confianza del 95% tomados inmediatamente después del batido y transcurrida una hora, de las espumas formadas con fases continuas con cada una de las concentraciones de goma xantana y concentrado de suero de leche.

El análisis estadístico señaló que la goma xantana tuvo efecto sobre el diámetro de burbuja ( $P = 0.015$ ) sólo al aumentar la concentración de 0.10 a 0.15 %. El concentrado de suero de leche tuvo poco efecto significativo sobre el diámetro de burbuja ( $P = 0.046$ ), ya que al aumentar su concentración de 10 a 15 % y de 15 a 20 % los diámetros de burbuja tomados inmediatamente después del batido fueron estadísticamente iguales, sin embargo, al aumentarlo 10 % (de 10 a 20 %) si tuvo efecto, esto se puede observar en la Figura 3.18 (a), ya que al aumentar la concentración de suero de leche se tienen más proteínas que rodean una mayor área

superficial de las burbujas, formando mayor número de burbujas con un menor tamaño (Fains y col., 1997).

Cuadro 3.13. Diámetro de burbuja ( $\mu\text{m}$ ) de espumas formadas con fases continuas con cada una de las concentraciones de goma xantana y concentrado de suero de leche.

| Corrida | Goma xantana (%) | Concentrado suero de leche (%) | Leche descremada (%) | Promedio ( $\mu\text{m}$ ) | Desv. Estándar | Coefficiente variación (%) | Intervalo de confianza |     |
|---------|------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|------------------------|-----|
| 1       | 0.05             | 10                             | Inicial              | 107                        | 3              | 3                          | 103                    | 112 |
|         |                  |                                | 1 hora               | 129                        | 2              | 2                          | 125                    | 134 |
| 2       | 0.05             | 15                             | Inicial              | 101                        | 3              | 3                          | 94                     | 106 |
|         |                  |                                | 1 hora               | 117                        | 6              | 5                          | 109                    | 128 |
| 3       | 0.05             | 20                             | Inicial              | 89                         | 4              | 4                          | 84                     | 97  |
|         |                  |                                | 1 hora               | 102                        | 2              | 2                          | 98                     | 108 |
| 4       | 0.1              | 10                             | Inicial              | 100                        | 4              | 4                          | 94                     | 108 |
|         |                  |                                | 1 hora               | 114                        | 2              | 2                          | 110                    | 120 |
| 5       | 0.1              | 15                             | Inicial              | 95                         | 4              | 4                          | 89                     | 105 |
|         |                  |                                | 1 hora               | 106                        | 3              | 2                          | 101                    | 109 |
| 6       | 0.1              | 20                             | Inicial              | 93                         | 2              | 2                          | 88                     | 96  |
|         |                  |                                | 1 hora               | 101                        | 1              | 1                          | 97                     | 104 |
| 7       | 0.15             | 10                             | Inicial              | 88                         | 2              | 2                          | 85                     | 91  |
|         |                  |                                | 1 hora               | 98                         | 3              | 3                          | 97                     | 103 |
| 8       | 0.15             | 15                             | Inicial              | 85                         | 2              | 3                          | 81                     | 90  |
|         |                  |                                | 1 hora               | 93                         | 2              | 2                          | 90                     | 97  |
| 9       | 0.15             | 20                             | Inicial              | 81                         | 2              | 3                          | 78                     | 85  |
|         |                  |                                | 1 hora               | 87                         | 2              | 3                          | 83                     | 89  |

El análisis estadístico también mostró que la interacción si tuvo efecto significativo ( $P < 0$ ). En la Figura 3.18 (b) se observa que el efecto que tuvo el concentrado de suero de leche es más notorio con la concentración de 0.05 % de goma xantana; además se observa que el diámetro de burbuja fue menor con la mayor concentración de suero de leche (20 %) y de goma xantana (0.15 %), lo cual quiere decir que la viscosidad de la fase continua no interfirió con las proteínas para formar burbujas más pequeñas.

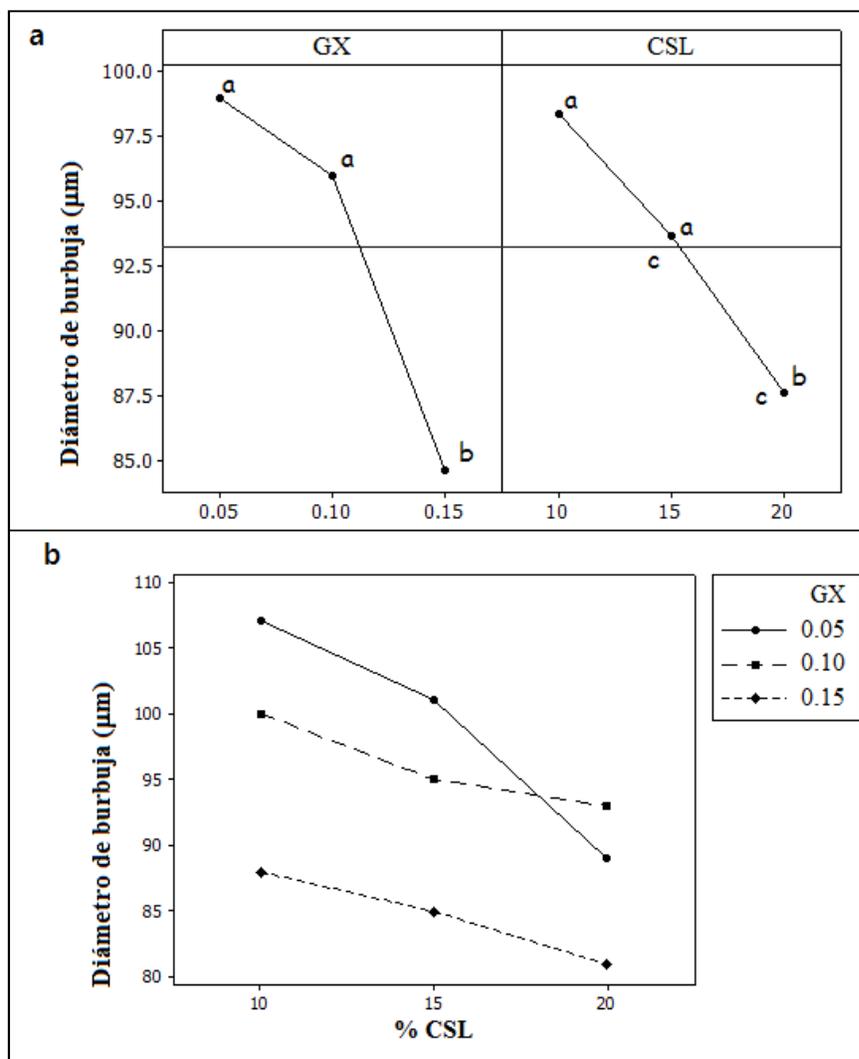


Figura 3.18 Valores medios del diámetro de burbuja de los sistemas de estudio inmediatamente después del batido a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

En las fotos de la Figura 3.19 se muestra que después de una hora las burbujas tienen un mayor tamaño, debido a que la diferencia de tamaño de las burbujas provoca un gradiente de presión entre las mismas, y promueve difusión de gas entre ellas (Maduración de Ostwald), en donde las burbujas de mayor tamaño se alimentan de las más pequeñas (Schramm, 2005). En la lamela se encuentran la leche descremada, la goma xantana y el concentrado de suero de leche, siendo la concentración de éstos la que influye sobre la difusión de aire, que se da con el paso del tiempo.

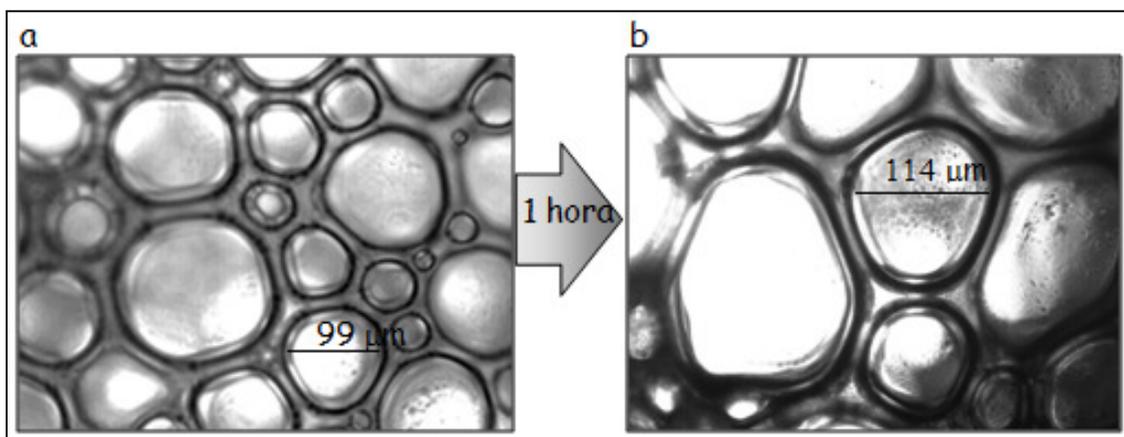


Figura 3.19. Foto con el objetivo 10x inmediatamente después del batido (a) y transcurrida una hora (b), de la espuma con 0.05% de goma xantana, 10% de concentrado de suero de leche y 10% de leche descremada.

En el Cuadro 3.14 se muestra el porcentaje de cambio de diámetro de burbuja, el cual se calculó del cuadro 3.13.

Cuadro 3.14 Porcentaje de cambio entre los tamaños de burbuja inmediatamente después del batido y transcurrida una hora.

| Corrida | Goma xantana (%) | Concentrado de suero de leche (%) | % de cambio (inicio-1hora) |
|---------|------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 1       | 0.05             | 10                                | 17                         |
| 2       | 0.05             | 15                                | 14                         |
| 3       | 0.05             | 20                                | 13                         |
| 4       | 0.1              | 10                                | 13                         |
| 5       | 0.1              | 15                                | 10                         |
| 6       | 0.1              | 20                                | 8                          |
| 7       | 0.15             | 10                                | 10                         |
| 8       | 0.15             | 15                                | 8                          |
| 9       | 0.15             | 20                                | 7                          |

Existen diferencias significativas entre el porcentaje de aumento de tamaño de burbuja por efecto tanto de la goma xantana como del concentrado de suero de leche ( $P < 0$ ). En la Figura 3.20 (a) se observa que éste disminuye al aumentar

principalmente la concentración de goma xantana, ya que una mayor viscosidad de la fase continua promueve menor tamaño de la burbuja por más tiempo, debido a la disminución de las velocidades de coalescencia (Kamath y col., 2008). Además en la Figura 3.20 (b) se observa que el menor cambio se dio en la espuma con mayor consistencia ya que como se ha mencionado antes dificulta que la difusión de gas entre las burbujas.

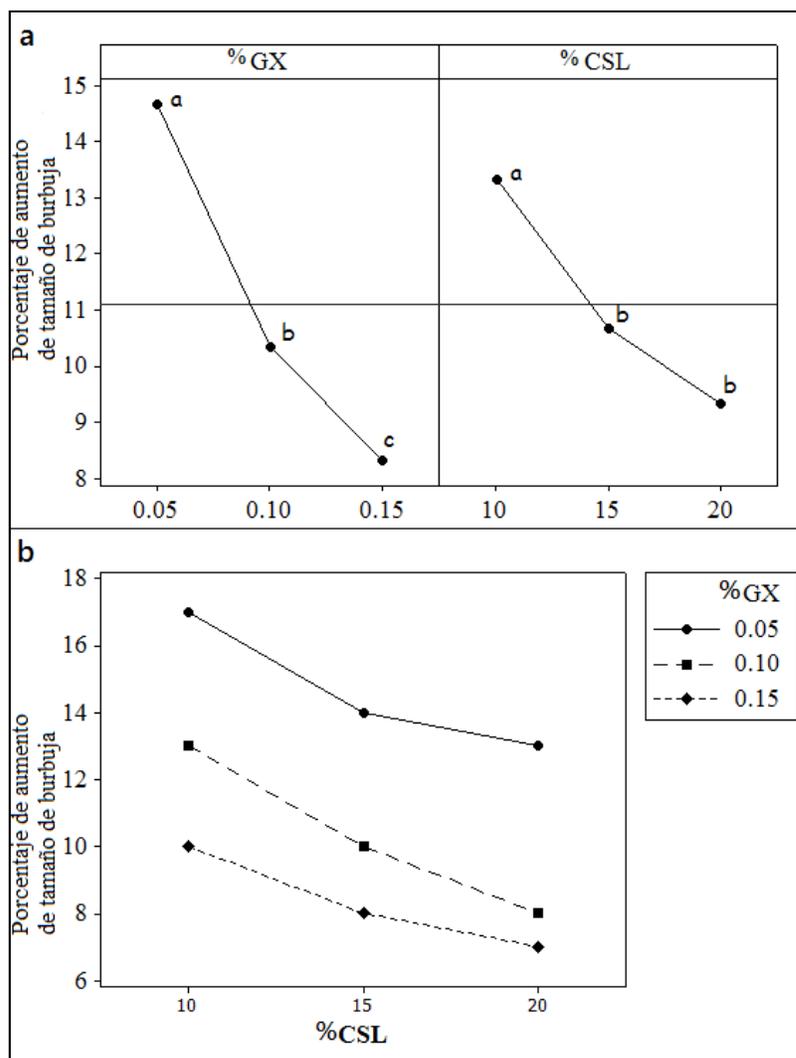


Figura 3.20 Valores medios del porcentaje de aumento de tamaño de burbuja de los sistemas de estudio inmediatamente después del batido a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

### 3.3.3 DRENADO EN COPAS DE ESTABILIDAD

En las pruebas de drenado en copas de estabilidad se realizaron tres repeticiones por cada concentración de goma xantana y concentrado de suero de leche. En las Figuras 3.21, 3.22 y 3.23 se muestran las curvas de drenado para los experimentos con 0.05, 0.10 y 0.15 % de goma xantana respectivamente. Se observa que se tuvo una gran diferencia con respecto al tiempo de desestabilización para cada concentración de goma xantana, ya que van desde las menos estables que duran aproximadamente 90 minutos, hasta las más estables que llegan hasta las 12 horas.

A cada curva se le realizaron distintas regresiones (lineal, exponencial, potencial, logarítmico), ajustando la mayoría al modelo lineal.

La regresión lineal está dada como:  $y = mx + b$

Donde:  $m$  es la pendiente o en este caso la velocidad de drenado (ml/min) y  $b$  la ordenada al origen (ml).

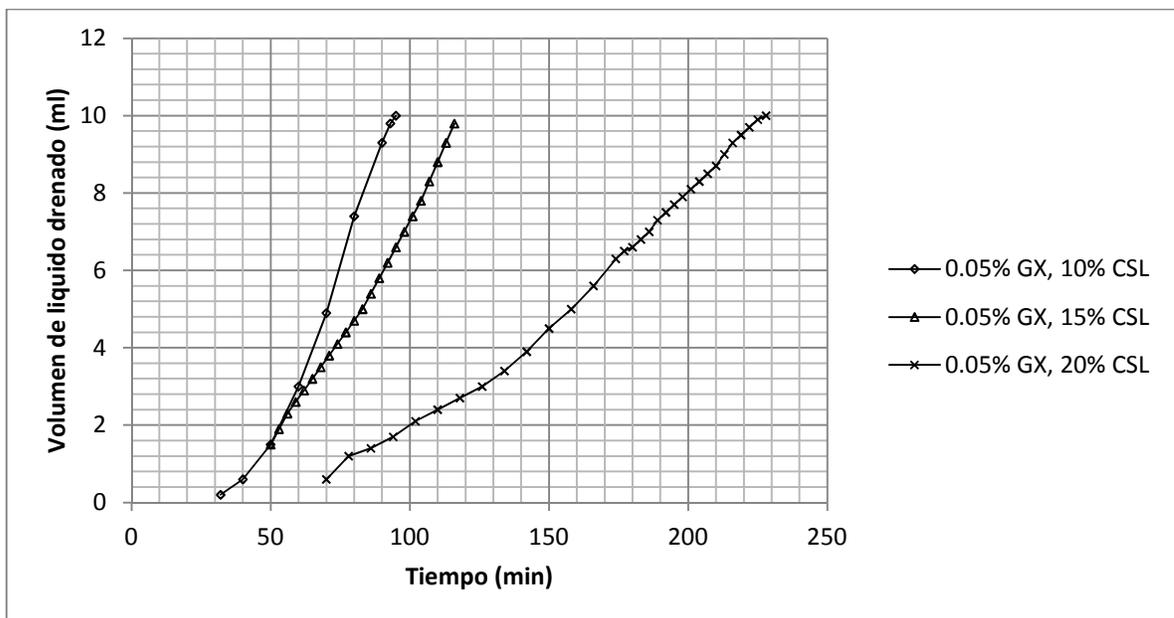


Figura 3.21 Curvas de volumen de líquido drenado con respecto al tiempo para espumas formadas con fases continuas con 0.05% de goma xantana, (10, 15 y 20 %) concentrado de suero de leche y 10% de leche descremada (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

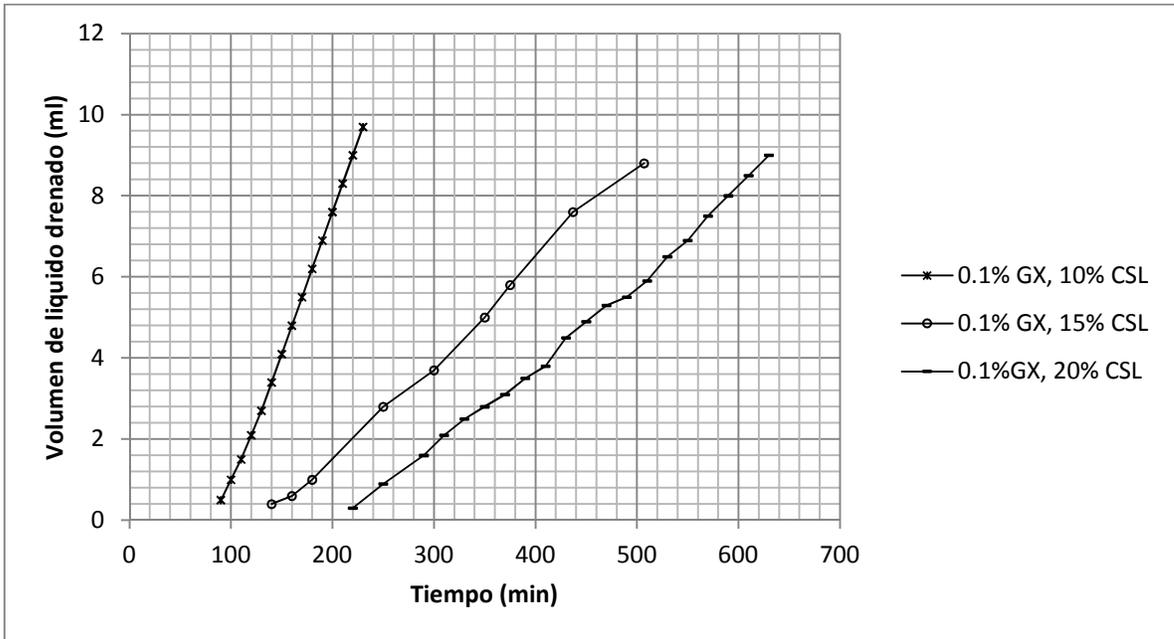


Figura 3.22. Curvas de volumen de líquido drenado con respecto al tiempo para espumas formadas con fases continuas con 0.10% de goma xantana, (10, 15 y 20 %) concentrado de suero de leche y 10% de leche descremada (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

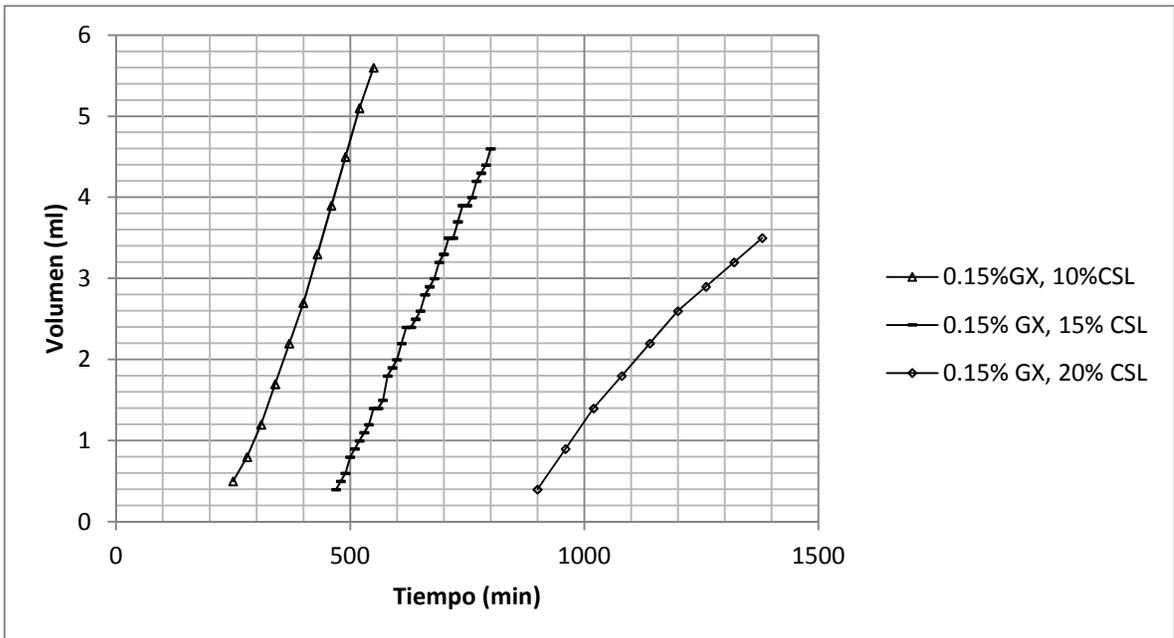


Figura 3.23. Curvas de volumen de líquido drenado con respecto al tiempo para espumas formadas con fases continuas con 0.15% de goma xantana, (10, 15 y 20 %) concentrado de suero de leche y 10% de leche descremada (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

En el Cuadro 3.15 se muestra el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación para la velocidad de drenado de cada una de las concentraciones de goma xantana con concentrado de suero de leche. Se observa que la mayoría de las velocidades medias son confiables ya que el porcentaje de coeficiente de variación es menor a 10 %.

Cuadro 3.15 Velocidad de drenado (ml/min) para las espumas lácteas elaboradas con las diferentes concentraciones de goma xantana con concentrado de suero de leche.

| Corrida | % goma xantana | % concentrado suero de leche | % Leche descremada | Promedio de velocidad de drenado (ml/min) | Desv. estándar | Coficiente variación (%) |
|---------|----------------|------------------------------|--------------------|---|----------------|--------------------------|
| 1       | 0.05           | 10                           | 10                 | 0.162                                     | 0.014          | 9                        |
| 2       | 0.05           | 15                           | 10                 | 0.117                                     | 0.006          | 5                        |
| 3       | 0.05           | 20                           | 10                 | 0.065                                     | 0.006          | 9                        |
| 4       | 0.1            | 10                           | 10                 | 0.070                                     | 0.003          | 4                        |
| 5       | 0.1            | 15                           | 10                 | 0.026                                     | 0.002          | 9                        |
| 6       | 0.1            | 20                           | 10                 | 0.021                                     | 0.002          | 9                        |
| 7       | 0.15           | 10                           | 10                 | 0.018                                     | 0.001          | 8                        |
| 8       | 0.15           | 15                           | 10                 | 0.012                                     | 0.001          | 9                        |
| 9       | 0.15           | 20                           | 10                 | 0.0065                                    | 0.0000         | 1                        |

El análisis estadístico señaló que tanto la goma xantana como el concentrado de suero de leche tuvieron efecto sobre la velocidad de drenado ( $P = 0$ ), ya que como se muestra en la Figura 3.24 (a) las velocidades fueron estadísticamente diferentes para las distintas concentraciones de ambas macromoléculas. Sin embargo, en la Figura 3.24 (a) también se observa que el factor que mayor efecto tiene sobre la velocidad de drenado es la goma xantana, ya que como se observó en las propiedades de flujo la goma xantana aumenta significativamente la viscosidad de la fase continua, por lo que, retarda la segregación de burbujas, la succión capilar, y por lo tanto el drenado de líquido (Salager y col., 1999).

El análisis estadístico también señaló efecto significativo ( $P = 0$ ) de la interacción sobre la velocidad de drenado. En la Figura 3.24 (b) se muestra la interacción

estadística de los factores, donde como ya se había mencionado la velocidad de drenado disminuye al aumentar la concentración de concentrado de suero de leche, este efecto es más notorio con la concentración de 0.05 % de goma xantana.

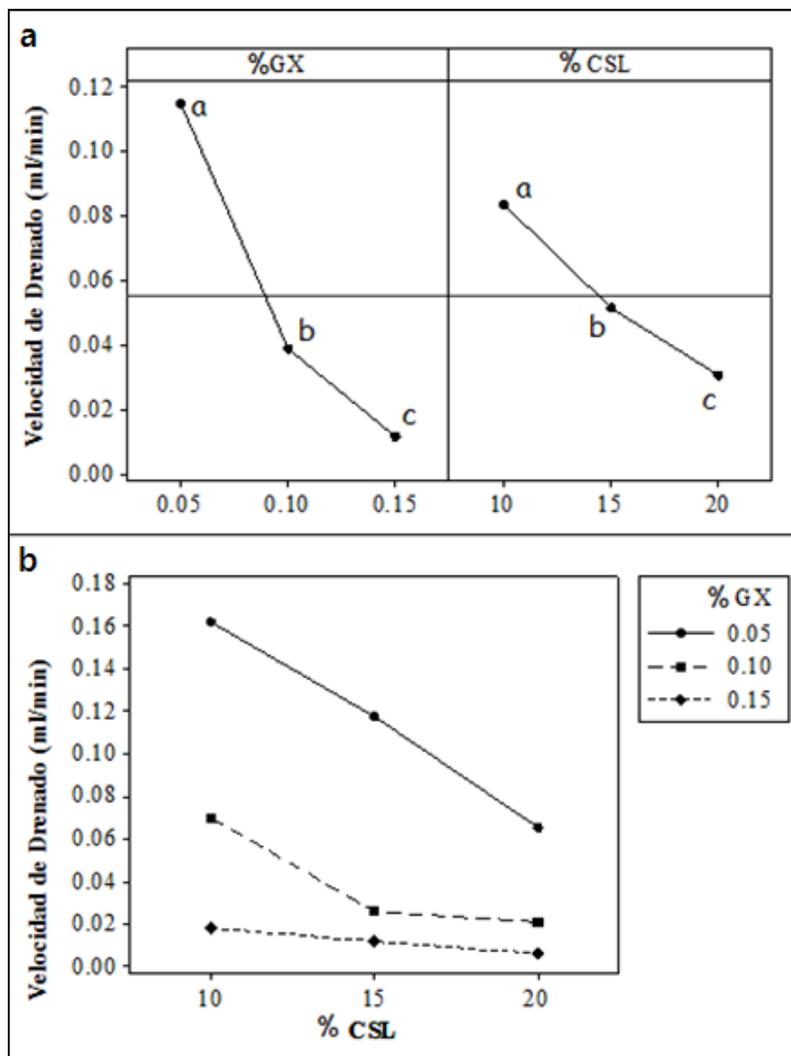


Figura 3.24 Valores medios de la velocidad de drenado de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

De las ecuaciones que se obtuvieron de las curvas, se calcularon los tiempos en los que se comenzó a registrar un cambio, es decir, un drenado, esto despejando  $x$  de la ecuación de línea recta y sustituyendo a  $y = 0 \text{ mm}$ :

$$y = mx + b \rightarrow x = \frac{y - b}{m}$$

En el Cuadro 3.16 se muestran los tiempos de inicio de drenado para cada una de las corridas.

Cuadro 3.16. Tiempo de inicio de drenado (min) para las espumas lácteas elaboradas con las diferentes concentraciones de goma xantana con concentrado de suero de leche.

| Corrida | % goma xantana | % concentrado suero de leche | % leche descremada | Promedio de tiempo de inicio de drenado (min) | Desv. estándar | Coefficiente variación (%) |
|---------|----------------|------------------------------|--------------------|---|----------------|----------------------------|
| 1       | 0.05           | 10                           | 10                 | 36  | 2              | 5                          |
| 2       | 0.05           | 15                           | 10                 | 38  | 3              | 8                          |
| 3       | 0.05           | 20                           | 10                 | 75  | 7              | 9                          |
| 4       | 0.1            | 10                           | 10                 | 95  | 8              | 8                          |
| 5       | 0.1            | 15                           | 10                 | 121   | 10             | 8                          |
| 6       | 0.1            | 20                           | 10                 | 202   | 19             | 9                          |
| 7       | 0.15           | 10                           | 10                 | 224   | 22             | 10                         |
| 8       | 0.15           | 15                           | 10                 | 427   | 20             | 5                          |
| 9       | 0.15           | 20                           | 10                 | 780   | 64             | 8                          |

En la Figura 3.25 (a) se observa que el tiempo de inicio de drenado aumenta conforme aumentan las concentraciones de goma xantana y de concentrado de suero de leche, además, el análisis estadístico con P igual a cero señala que este efecto es significativo.

En el análisis estadístico además se obtuvo un valor de P de cero para la interacción de los factores. En la Figura 3.25 (b), se observa que con la concentración de 0.05 % de goma xantana el efecto del concentrado de suero de leche sobre el tiempo inicial de drenado es poco notorio, sin embargo con la concentración de 0.15 % de goma xantana, la pendiente de aumento de tiempo por efecto del concentrado de suero de leche aumentó, por lo que la espuma que tardó más tiempo en drenar fue aquella con 0.15 % de goma xantana y 20 % de concentrado de suero de leche ya que su fase continua tiene la mejor consistencia.

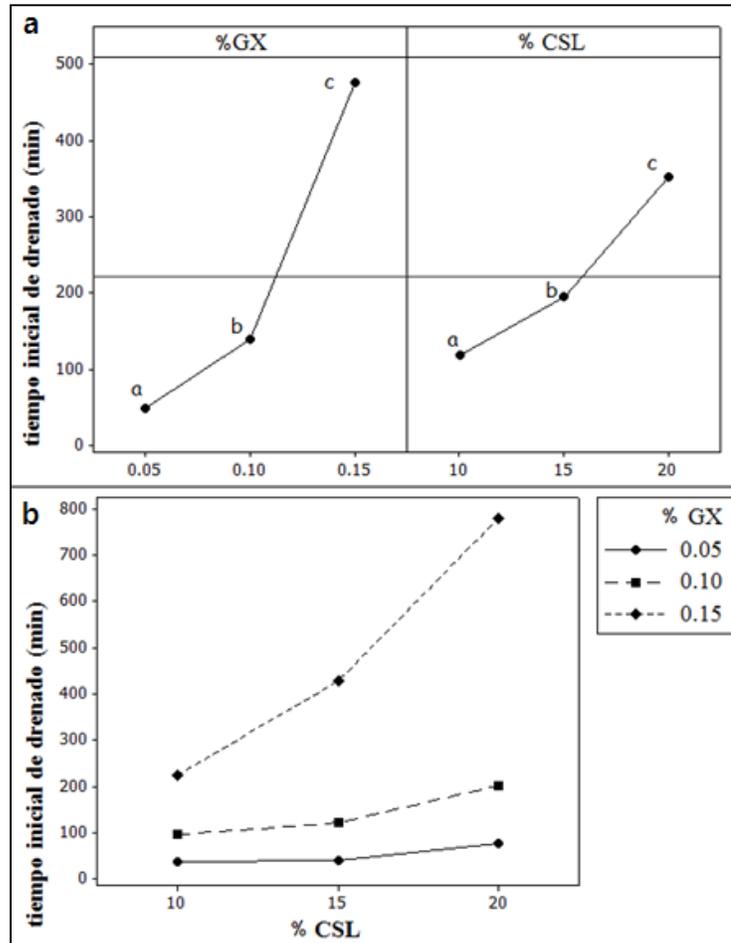


Figura 3.25 Valores medios tiempo inicial de drenado de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

### 3.3.4 ESTABILIDAD POR DISPERSIÓN DE LUZ

Se cuantificó la luz transmitida y retro dispersa a través de la espuma formada, en el turbiscan, este instrumento proporciona dos gráficos por cada muestra, uno de transmisión de luz y otro de retrodispersión de luz. Se tomaron en cuenta sólo las curvas de retrodispersión, ya que es en éstas donde se observan cambios en la espuma a lo largo del tiempo. Se realizaron las diferentes curvas para cada concentración de goma xantana con concentrado de suero de leche, la duración de la mismas y la frecuencia de escaneo varió para cada muestra con respecto a los cambios que se iban observando, en la Figura 3.26 se presenta un ejemplo los fenómenos que se pueden observar en la curva de retrodispersión, principalmente el



### Zona A. Drenado

A continuación se muestra en la Figura 3.27 el ajuste a una línea recta de las curvas de aumento de líquido drenado en la parte inferior del vial, correspondiente a la zona A y una altura del líquido de 0-10 mm.

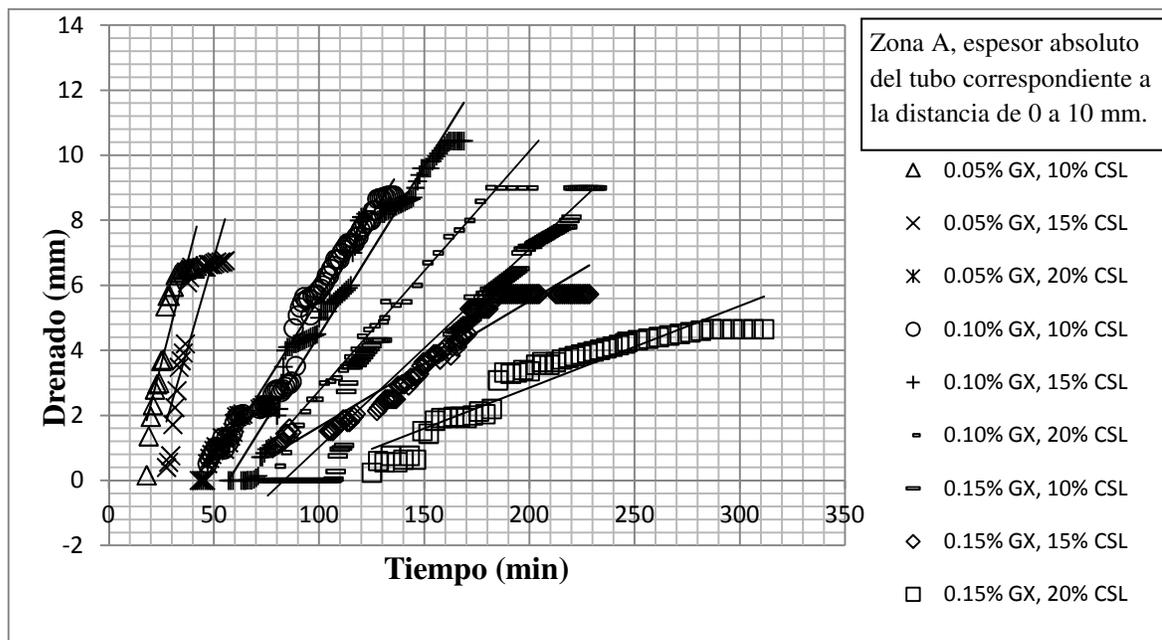


Figura 3.27. Ajuste a modelo lineal de las cinéticas de líquido drenado para cada una de las espumas estudiadas.

Cuadro 3.17. Velocidad de drenado proporcionado por la cinética de desestabilización para cada uno de los experimentos.

| % Goma xantana | % Concentrado de suero de leche | % Leche descremada | Velocidad promedio (mm/min) | Desv. estándar | Coefficiente variación (%) |
|----------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------|----------------------------|
| 0.05           | 10                              | 10                 | 0.247                       | 0.006          | 2                          |
| 0.05           | 15                              | 10                 | 0.188                       | 0.007          | 4                          |
| 0.05           | 20                              | 10                 | 0.157                       | 0.007          | 4                          |
| 0.1            | 10                              | 10                 | 0.106                       | 0.006          | 6                          |
| 0.1            | 15                              | 10                 | 0.094                       | 0.002          | 3                          |
| 0.1            | 20                              | 10                 | 0.073                       | 0.002          | 3                          |
| 0.15           | 10                              | 10                 | 0.049                       | 0.003          | 7                          |
| 0.15           | 15                              | 10                 | 0.035                       | 0.002          | 7                          |
| 0.15           | 20                              | 10                 | 0.020                       | 0.002          | 11                         |

En el cuadro 3.17 se muestran las velocidades de drenado obtenidas para cada uno de los experimentos. Se observa que en el caso de los coeficientes de variación se tienen en su mayoría valores menores a 10%, y se observa que las velocidades de drenado van desde 0.26 mm/min y disminuye considerablemente hasta 0.02 mm/min.

Según el análisis estadístico las velocidades de drenado son diferentes sólo por efecto de la goma xantana (goma xantana  $P = 0.002$ , concentrado de suero de leche  $P = 0.075$ ).

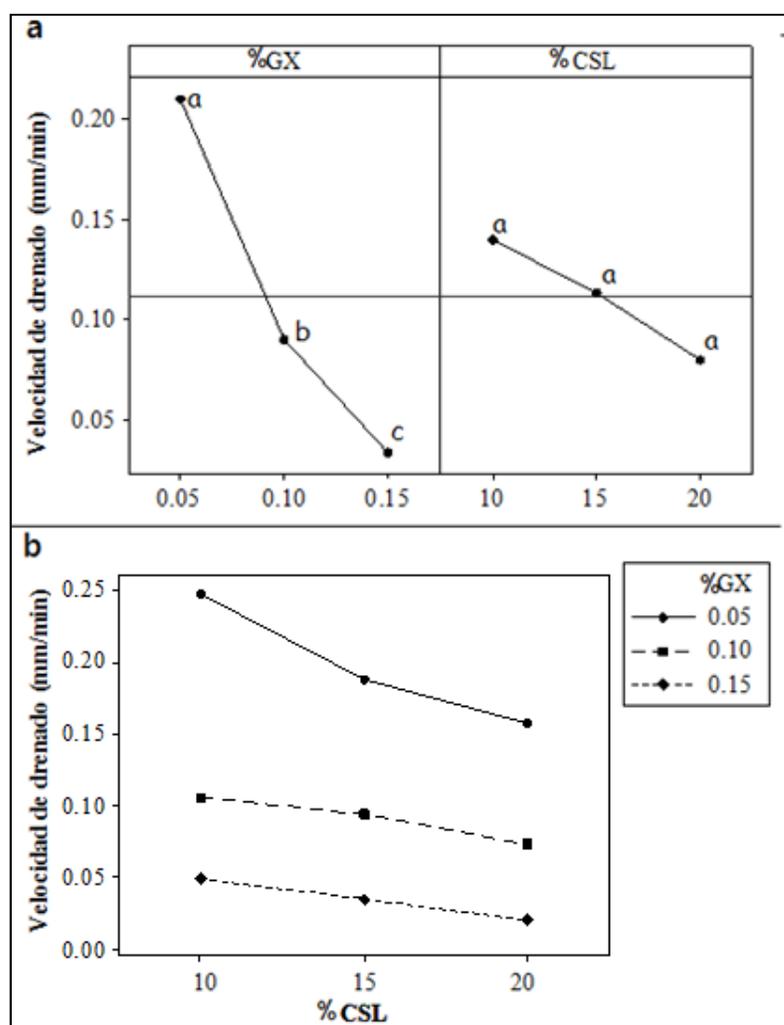


Figura 3.28 Valores medios de la velocidad de drenado (retrodispersión) de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

En la Figura 3.28 (a) se muestra que sólo la goma xantana tiene efecto significativo sobre la velocidad de drenado, a diferencia de la prueba de drenado en copas, en donde el concentrado de suero de leche si tuvo efecto, sin embargo este efecto fue menor que el de la goma xantana ya que el suero de leche no aporta suficiente consistencia a la fase continua para disminuir la velocidad de drenado (Narchi y col., 2009). En la Figura 3.28 (b) se observa que la velocidad disminuyó al aumentar ambas concentraciones, este efecto fue significativo según el análisis estadístico ( $P < 0.05$ ), también se observa que el efecto del concentrado de suero de leche es más notorio con la concentración de 0.05 % de goma xantana, asimismo el efecto de la goma xantana de 0.05 a 0.10 % va disminuyendo al aumentar la concentración de suero de leche. Por lo que se tiene una menor velocidad de drenado con la concentración de 0.15% de goma xantana y 20% de concentrado de suero de leche ya que la alta consistencia de la fase continua dificulta el drenado por gravedad (Schramm, 2005).

De las ecuaciones que se obtuvieron de las cinéticas, se calcularon los tiempos en los que se comenzó a registrar un cambio, es decir, un drenado, esto despejando  $x$  de la ecuación de línea recta y sustituyendo a  $y = 0 \text{ mm}$ :  $y = mx + b \rightarrow x = \frac{y-b}{m}$

Estos valores se presentan en el Cuadro 3.18, donde se observa que los coeficientes de variación son en su mayoría menores a 10.

Los valores de inicio de drenado obtenidos por el método de transmisión de luz a través de la espuma, van desde 9 a 90 minutos, por lo que al compararlos con los obtenidos por drenado en copas de estabilidad, los cuales fueron de 36 a 780 minutos, se observan valores muy distintos, probablemente debido a la capacidad que tiene el equipo de detectar el drenado aún si éste es menor a un mililitro, lo que es difícil utilizando la vista.

El análisis estadístico señaló que ambos factores tuvieron efecto sobre el tiempo de inicio de drenado ( $P = 0$ ).

Cuadro 3.18. Tiempo de inicio de drenado (min), registrado por la cinética de desestabilización para cada uno de las espumas lácteas.

| % goma xantana | % concentrado de suero de leche | % leche descremada | Tiempo promedio (min) | Desviación estándar | Coefficiente variación (%) |
|----------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|
| 0.05           | 10                              | 10                 | 10                    | 1                   | 8                          |
| 0.05           | 15                              | 10                 | 26                    | 2                   | 9                          |
| 0.05           | 20                              | 10                 | 32                    | 3                   | 10                         |
| 0.1            | 10                              | 10                 | 43                    | 3                   | 6                          |
| 0.1            | 15                              | 10                 | 51                    | 6                   | 11                         |
| 0.1            | 20                              | 10                 | 62                    | 3                   | 5                          |
| 0.15           | 10                              | 10                 | 70                    | 3                   | 4                          |
| 0.15           | 15                              | 10                 | 79                    | 4                   | 5                          |
| 0.15           | 20                              | 10                 | 87                    | 5                   | 6                          |

En la Figura 3.29 (a) se observa que la goma xantana tiene mayor efecto sobre el tiempo de inicio del drenado, al igual que en las copas de estabilidad, esto puede ser atribuido a que la goma xantana se comporta como un medio sólido, durante el reposo, debido a su estructura de microgel (dobles hélices) (Cubero y col., 2002). En la Figura 3.29 (b) se muestra la interacción estadística de la concentración del suero de leche y la goma xantana sobre el tiempo inicial de drenado, el cual según el análisis estadístico si tuvo efecto significativo, se observa que el efecto del concentrado de suero de leche fue muy similar para las tres concentraciones de goma xantana. Además, se observa que las concentraciones que retardan el drenado son aquellas en las que se obtuvo un mayor índice de consistencia (0.15% de goma xantana), esto debido a que como ya se dijo, se dificulta la segregación de burbujas y la succión capilar.

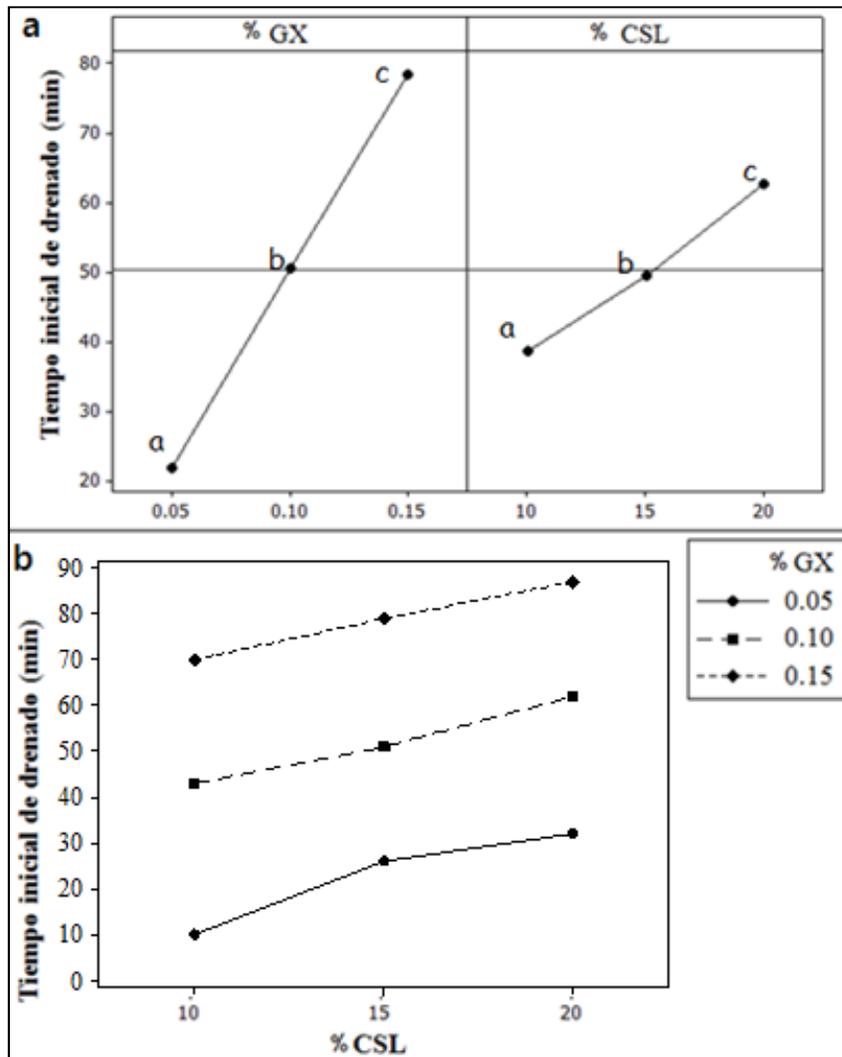


Figura 3.29 Valores medios del tiempo inicial de drenado (retrodispersión) de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

### *Zona B. Aumento de tamaño de burbuja*

Las cinéticas de aumento de tamaño de burbuja también fueron ajustadas al modelo lineal el cual proporciona la velocidad, a continuación se muestran, en la Figura 3.30, las cinéticas de aumento de tamaño de burbuja (zona B en la Figura 3.26) para cada una de las espumas lácteas estudiadas.

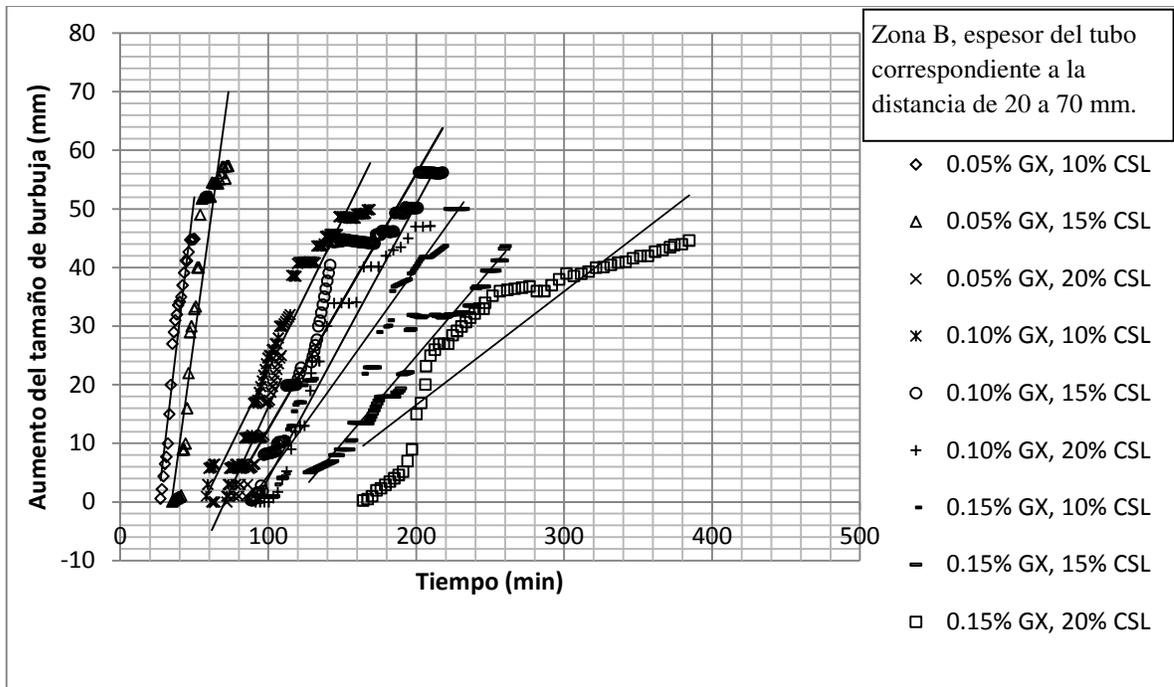


Figura 3.30. Cinéticas del aumento de tamaño de burbuja, ajustadas a una línea recta, para cada una de las espumas lácteas estudiadas.

En el Cuadro 3.19 se muestran las velocidades de aumento de tamaño de burbuja obtenidas para cada uno de los experimentos.

Cuadro 3.19. Velocidad de aumento de tamaño de burbuja (mm/min) proporcionado por la cinética de desestabilización para cada uno de los experimentos.

| % goma xantana | % concentrado de suero de leche | % leche descremada | Velocidad media (mm/min) | Desviación estándar | Coefficiente variación (%) |
|----------------|---------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|----------------------------|
| 0.05           | 10                              | 10                 | 2.18                     | 0.20                | 9                          |
| 0.05           | 15                              | 10                 | 1.66                     | 0.16                | 10                         |
| 0.05           | 20                              | 10                 | 1.26                     | 0.05                | 4                          |
| 0.1            | 10                              | 10                 | 0.51                     | 0.03                | 6                          |
| 0.1            | 15                              | 10                 | 0.44                     | 0.01                | 2                          |
| 0.1            | 20                              | 10                 | 0.42                     | 0.02                | 5                          |
| 0.15           | 10                              | 10                 | 0.36                     | 0.01                | 2                          |
| 0.15           | 15                              | 10                 | 0.27                     | 0.01                | 3                          |
| 0.15           | 20                              | 10                 | 0.19                     | 0.01                | 6                          |

En el Cuadro 3.19 se observa que la mayoría de los coeficientes de variación son menores a 10% y velocidades que van desde 2.18 mm/min y disminuyen hasta 0.19 mm/min con las concentraciones de 0.15% de goma xantana y 20% de concentrado de suero de leche.

La Figura 3.31 (a) muestra que sólo la goma xantana tuvo efecto significativo sobre la velocidad de aumento de tamaño de burbuja, lo cual se confirma con los valores de P los cuales fueron 0.002 y 0.253 para la goma xantana y el concentrado de suero de leche respectivamente.

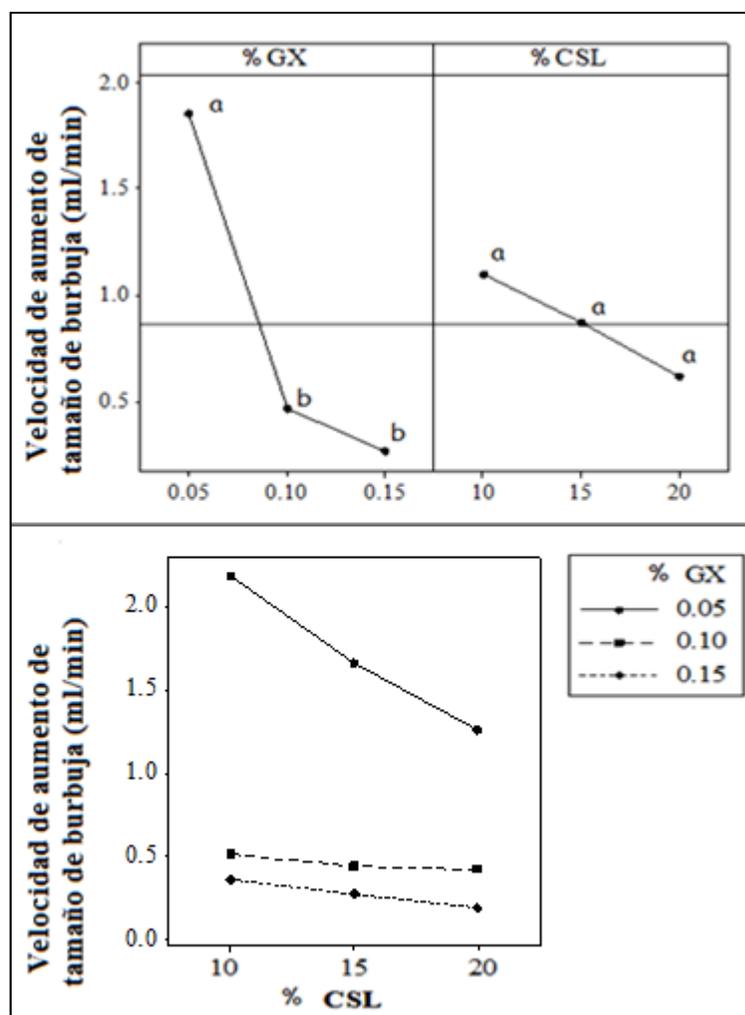


Figura 3.31 Valores medios de la velocidad de aumento de tamaño de burbuja de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

El aumento de tamaño de las burbujas pudo ocurrir por coalescencia o difusión de gas, estos fenómenos ocurren más fácilmente sí existe drenado de líquido, el cual, como se observó en la cinética de líquido drenado, se retarda con el aumento en la consistencia de la fase continua (dado principalmente por la goma xantana) (Schramm, 2005).

En la Figura 3.31 (b) se observa que la velocidad de aumento de tamaño de burbuja disminuye al aumentar ambas concentraciones, efecto que resultó significativo según el análisis estadístico ( $P = 0$ ). El efecto del concentrado de suero de leche es más notorio con la concentración de 0.05 % de goma xantana.

De las cinéticas obtenidas se obtuvieron, de igual forma, los tiempos en los que comenzó a aumentar el tamaño de burbuja, estos valores se presentan en el Cuadro 3.20, en el cual se observa que los tiempos de inicio de aumento de tamaño de burbuja son mayores que los de inicio de drenado, debido a que el drenado de la fase continua facilita el adelgazamiento de la lamela, y éste a su vez la difusión de aire entre las burbujas o su coalescencia (Schramm, 2005).

Cuadro 3.20. Tiempo de inicio de aumento de tamaño de burbuja (min) registrado por la cinética de desestabilización para cada uno de los experimentos.

| % goma xantana | % concentrado de suero de leche | % leche descremada | Tiempo promedio (min) | Desviación estándar | Coefficiente variación (%) |
|----------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|
| 0.05           | 10                              | 10                 | 26                    | 1                   | 3                          |
| 0.05           | 15                              | 10                 | 34                    | 3                   | 9                          |
| 0.05           | 20                              | 10                 | 52                    | 2                   | 3                          |
| 0.1            | 10                              | 10                 | 60                    | 1                   | 2                          |
| 0.1            | 15                              | 10                 | 70                    | 2                   | 3                          |
| 0.1            | 20                              | 10                 | 76                    | 7                   | 10                         |
| 0.15           | 10                              | 10                 | 85                    | 9                   | 11                         |
| 0.15           | 15                              | 10                 | 94                    | 2                   | 3                          |
| 0.15           | 20                              | 10                 | 112                   | 5                   | 4                          |

Según el análisis estadístico los tiempos de inicio de aumento de tamaño de burbuja fueron diferentes por efecto de ambos factores ( $P < 0$ ).

En la Figura 3.32 (a) se observa que la goma xantana tiene mayor efecto sobre el tiempo inicial de aumento de tamaño de burbuja al igual que sobre la velocidad.

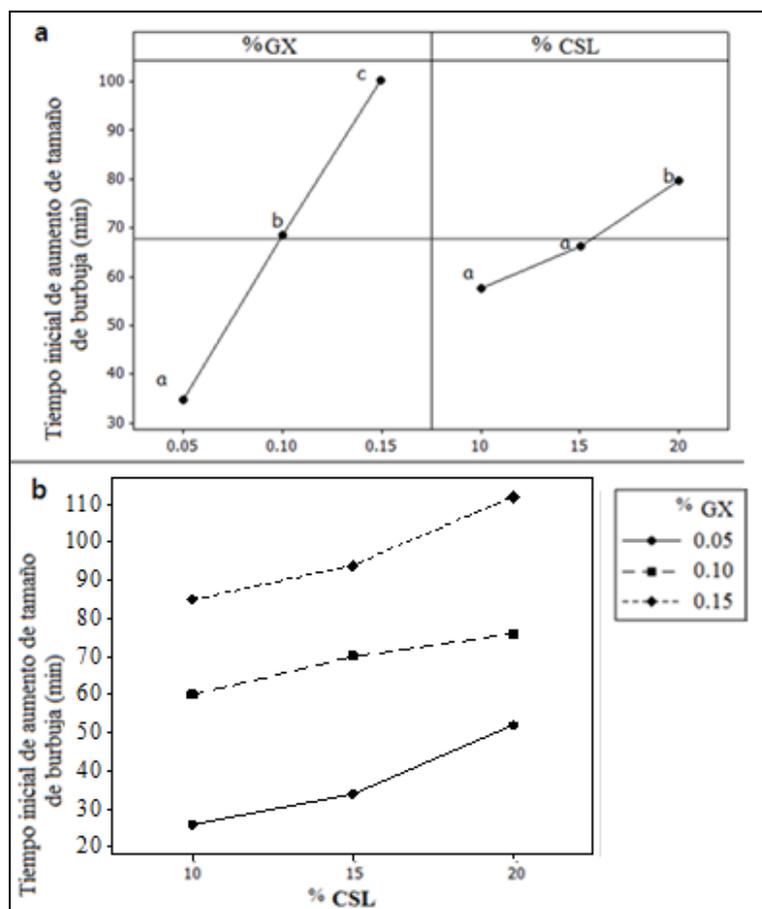


Figura 3.32 Valores medios del tiempo inicial de aumento de tamaño de burbuja de los sistemas de estudio a) efectos individuales b) interacción (GX-goma xantana, CSL-concentrado de suero de leche).

Además el análisis estadístico señaló efecto significativo de la interacción de los factores sobre el tiempo inicial de aumento de tamaño de burbuja. En la Figura 3.32 (b) mostrada a continuación se observa que con las tres concentraciones de goma xantana el efecto del concentrado de suero de leche es el de aumentar el tiempo de

inicio de maduración de Ostwald, debido al aumento de la consistencia de la fase continua.

### 3.4 TENSIÓN SUPERFICIAL Y REOLOGÍA DILATACIONAL

De acuerdo a la estabilidad de las espumas que formaron, se seleccionaron las fases continuas de 0.15% de goma xantana con 20% de concentrado de suero de leche (mayor), 0.1% de goma xantana con 15% de concentrado de suero de leche (media), y 0.05% de goma xantana con 10% de concentrado de suero de leche (baja). Para las pruebas de tensión superficial se prepararon las muestras sin leche descremada y se evaluó tensión superficial y reología dilatacional, esto con el fin de relacionar la velocidad de adsorción, así como las propiedades de la película a través del módulo viscoso y módulo elástico con la estabilidad de las espumas formadas.

En la Figura 3.33 se muestran las tres curvas representativas de variación de la tensión superficial con respecto al tiempo (cinéticas de adsorción).

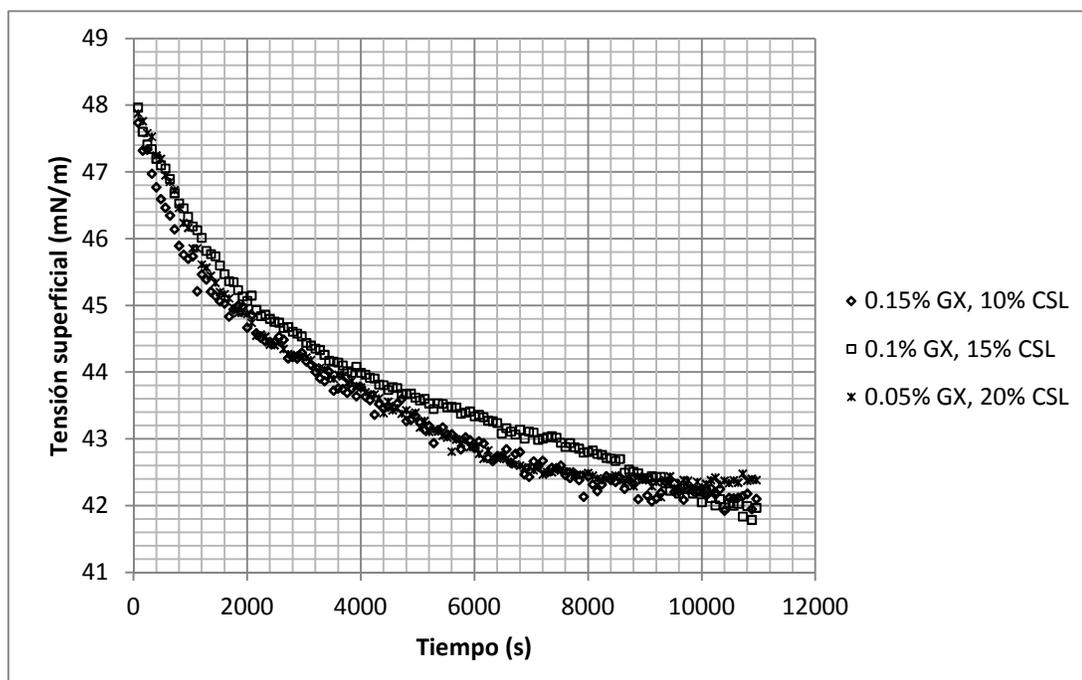


Figura 3.33. Curvas representativas de tensión superficial en función del tiempo para tres diferentes fases continuas.

En la Figura 3.33 se observa que las tres curvas presentan un comportamiento muy similar (se sobreponen) por lo que se puede inferir que las tres muestras presentan el mismo abatimiento de la tensión superficial, y casi a la misma velocidad de adsorción. Entre los 4000 y 8000 segundos, la muestra con 0.1 % de goma xantana y 15% de concentrado de suero de leche, presentó una separación de las otras dos tendencias.

Para observar mejor el proceso de adsorción de las proteínas de la fase continua se graficaron las curvas de la Figura 3.33 en escala semi logarítmica, las cuales se presentan en la Figura 3.34, así mismo en la Figura 3.35 se representan las etapas del proceso de adsorción en un caso ideal que ayudará a explicar la Figura 3.34.

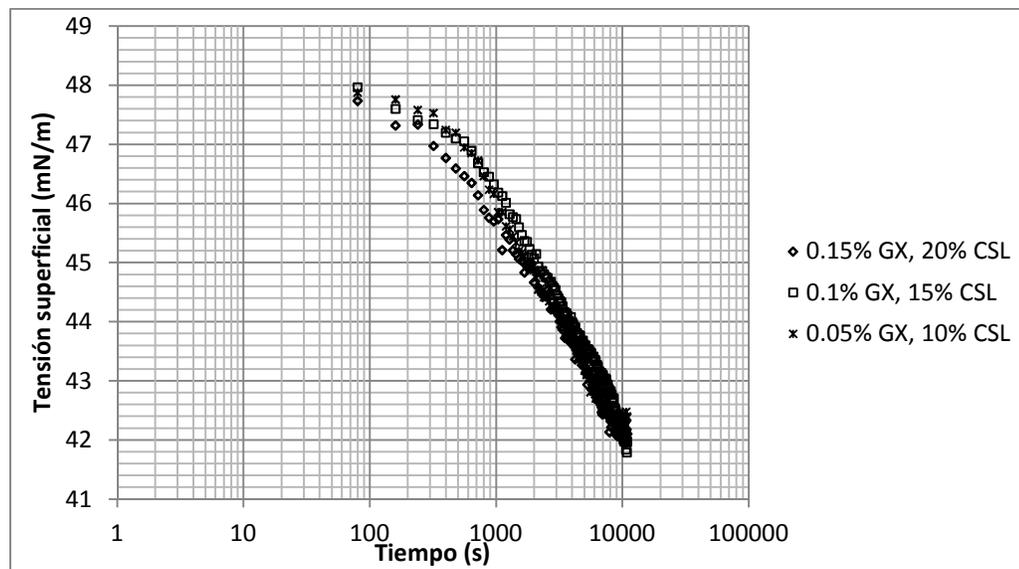


Figura 3.34 Cinética de adsorción en la interfase aire-agua, de las proteínas de las fases continuas estudiadas.

En la Figura 3.35 se distinguen tres regiones: Periodo de inducción (a), periodo de penetración (b, c) y periodo de saturación (c, d). En el primero la tensión permanece constante, en el periodo de penetración, la tensión disminuye rápidamente y en el último periodo (saturación) la proteína satura la superficie y la tensión superficial

entra en una fase de disminución muy lenta debido a la gradual desnaturalización de la proteína (Beverung y col., 1999).

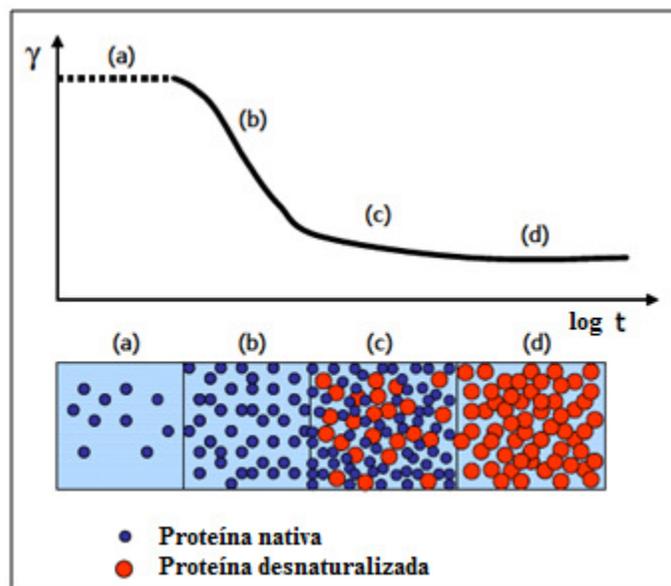


Figura 3.35. Etapas del proceso de adsorción dinámica de proteínas en interfaces aire-agua (Wege, 2002).

En la Figura 3.34 se observa que no se ha alcanzado el periodo de saturación (estabilidad superficial), probablemente debido a que se requiere mayor tiempo para que las proteínas del suero de leche se desnaturalicen, para el caso de la goma xantana en un estudio realizado por Bonilla (2011), se observó que la xantana no se adsorbe en la interfase a bajas concentraciones, por lo que no modifica la tensión superficial al comportarse como el agua pura.

Con la finalidad de realizar una comparación numérica de las curvas anteriores se obtuvieron los valores de tensión superficial al inicio, y la tensión superficial después de 11 000 segundos, determinadas  $\gamma$  inicial y  $\gamma$  final respectivamente, estos valores se muestran en el Cuadro 3.21, donde se puede observar que para las tres fases continuas la tensión superficial inicial se encuentra alrededor de 48 mN/m, y después de 11 000 segundos se alcanza una tensión superficial de alrededor de 42

mN/m, por lo que se observa que las proteínas del suero disminuyeron la tensión superficial en seis unidades, sin importar su concentración (10, 15 y 20 %).

Cuadro 3.21. Tensión superficial inicial y transcurridos 11 000 segundos para tres diferentes fases continuas.

| % goma xantana | % concentrado de suero de leche | % leche descremada | Tensión superficial ( $\gamma$ ) Promedio |       | Desv. Estándar | Coeficiente variación (%) |
|----------------|---------------------------------|--------------------|---|-------|----------------|---------------------------|
|                |                                 |                    | Inicial                                   | final |                |                           |
| 0.05           | 10                              | 10                 | Inicial                                   | 48.0  | 0.2            | 0.3                       |
|                |                                 |                    | final                                     | 42.3  | 0.1            | 0.3                       |
| 0.1            | 15                              | 10                 | Inicial                                   | 48.3  | 0.5            | 0.9                       |
|                |                                 |                    | final                                     | 42.3  | 0.4            | 1.0                       |
| 0.15           | 20                              | 10                 | Inicial                                   | 47.9  | 0.3            | 0.6                       |
|                |                                 |                    | final                                     | 42.5  | 0.5            | 1.2                       |

Finalmente se obtuvieron los módulos elástico dilatacional y viscoso dilatacional en función de la frecuencia con una amplitud de 36.7 % (5.5  $\mu$ L) en la zona de viscoelasticidad lineal, para cada fase continua seleccionada. A continuación se muestran las Figuras 3.36 y 3.37, las cuales corresponden a los módulos viscoso dilatacional y elástico dilatacional respectivamente, en función de la frecuencia.

Cuando la interfase de un material se comporta de una manera visco-elástica, el componente elástico es considerado como la energía recuperable almacenada en la interfase y el componente viscoso refleja la pérdida de energía a través de procesos de relajación (Boss y Vliet, 2001). En las Figuras 3.36 y 3.37 se puede observar que el módulo viscoso predomina a bajas frecuencias ya que la compresión-expansión es más lenta y se da el tiempo para que el material pierda energía por relajación, sin embargo a frecuencias altas (mayores a 0.1 Hz) el módulo elástico predomina ya que el material no presenta relajación y almacena la energía para recuperarse de la compresión-expansión. Además se observó que el módulo elástico (Figura 3.37), no presenta grandes cambios al modificar las concentraciones de goma xantana y

concentrado de suero de leche, ya que para todas las concentraciones se encuentran alrededor de 20 mN/m, lo cual indica que la elasticidad de la interfase no tiene efecto sobre la estabilidad de la espuma, ya que ésta está dada por la consistencia que brinda la goma xantana a la fase continua, dándole resistencia y retardando la coalescencia.

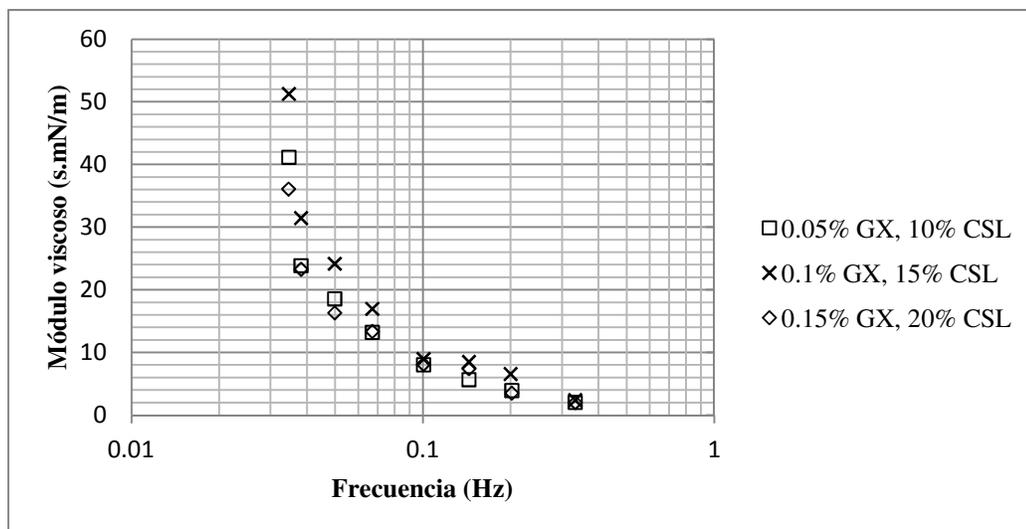


Figura 3.36. Módulo viscoso (s. mN/m) en función de la frecuencia para las fases continuas estudiadas a una amplitud de 36.7 %.

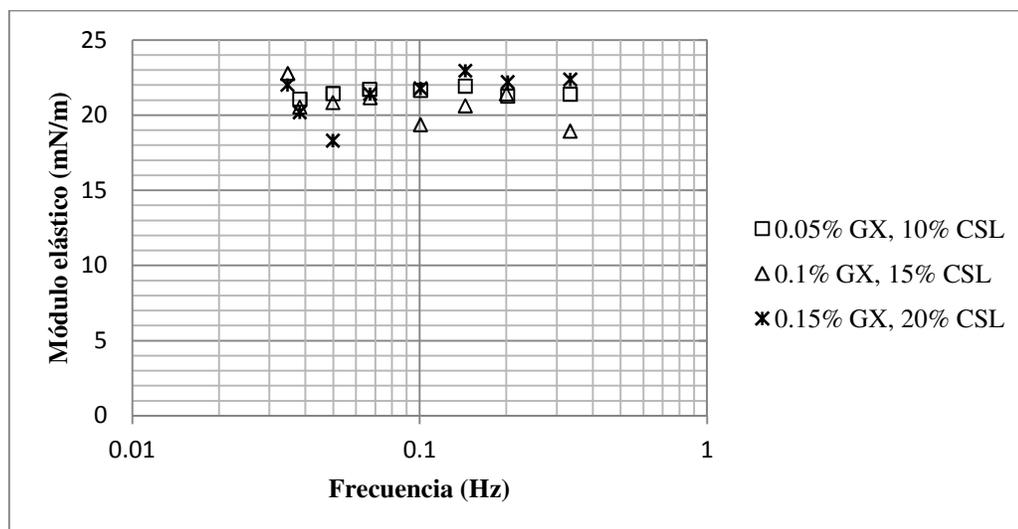


Figura 3.37. Módulo elástico (mN/m) en función de la frecuencia para las fases continuas estudiadas a una amplitud de 36.7 %.

## CONCLUSIONES

Al evaluar las propiedades de las fases continuas, se determinó que el factor que tiene mayor efecto sobre la densidad relativa es el concentrado de suero de leche, debido a que se agregó en mayor proporción a las mezclas (10-20%). El pH de la fase continua osciló entre 6.2 y 6.8, por lo que la mayoría de las proteínas presentes en la fase continua mostraron carga negativa, evitando las interacciones electrostáticas proteína-polisacárido.

En el tamaño de partícula sin aplicar ultrasonido a las fases continuas, los valores de diámetro medio se encontraron entre 107 y 118  $\mu m$ , similares a los de leche descremada y concentrado de suero de leche, probablemente debido a la formación de agregados de caseínas y seroproteínas, como las lactoglobulinas, ya que al aplicar ultrasonido, tanto a las fases continuas como a la leche descremada y al concentrado de suero de leche, se obtuvo un comportamiento bimodal (dos picos), lo que indican su disgregación. La goma xantana mostró tamaños de partícula de alrededor de 3  $\mu m$ , por lo que es probable que en las fases continuas, este grupo de partículas se encuentren en el primer pico. En el comportamiento reológico se observó que la leche descremada 10% y el concentrado de suero de leche tuvieron un comportamiento newtoniano, mientras que la goma xantana mostró una viscosidad constante a bajas velocidades de cizalla y adelgazamiento a velocidades de cizalla superiores, que se ajustó al modelo de Carreau. Las fases continuas de estudio presentaron un comportamiento más cercano al comportamiento de la goma xantana (modelo de Carreau). Se identificó la zona fluidificante y se ajustaron al modelo de la potencia; en general, se observó que tanto el índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), como el índice de consistencia ( $K$ ), se modificaron al aumentar principalmente la goma xantana; sin embargo el concentrado de suero de leche también tuvo efecto sobre los mismos.

La capacidad espumante de la leche descremada aumentó principalmente por efecto del concentrado de suero de leche; no obstante, también aumento al aumentar la concentración de goma xantana de 0.05 a 0.10 %. Se observó que con la concentración de goma xantana de 0.15 % el rendimiento ya no aumentó, probablemente por la alta consistencia desarrollada que reduce la movilidad de las proteínas que captan el aire y rodean la superficie de la burbuja. Entonces, el rendimiento más alto lo proporcionó la mezcla de 10 % de leche descremada, 0.1 % de goma xantana y 20 % de concentrado de suero de leche. Además, el diámetro de burbuja, medido inmediatamente después del batido, disminuyó al aumentar la concentración de concentrado de suero de leche de 10 a 20 %, pues al aumentar las proteínas, éstas rodean una mayor área superficial de las burbujas, formando mayor número de burbujas con un menor tamaño

En cuanto a la estabilidad de la espuma formada, el aumento de tamaño de burbuja, la velocidad de drenado, el tiempo de inicio de drenado y el tiempo de inicio de aumento de tamaño de burbuja disminuyeron por efecto, principalmente, de la goma xantana; esto gracias al incremento de la consistencia de la fase continua. Por lo tanto, la espuma más estable fue aquella con 0.15% de goma xantana y 20% de concentrado de suero de leche.

Finalmente, la adsorción en la interfase no mostró cambios significativos con la modificación en la concentración de goma xantana, ni de concentrado de suero de leche; probablemente por la alta concentración de proteínas. El módulo elástico tampoco mostró cambios visibles al modificar las concentraciones de las macromoléculas.

Se puede decir que al adicionar concentrado de suero de leche y goma xantana a la leche descremada resultan mezclas con mayor capacidad espumante y mejor estabilidad, la cual estuvo dada por la consistencia que brinda la goma xantana a la fase continua y no por la elasticidad de la lamela.

## REFERENCIAS CITADAS

- Alais, C. (1985). *Ciencia de la Leche*. España: Reverté:  
<http://books.google.com.mx/>
- Alais, C., y Lacasa, A. (1985). *Ciencia de la Leche: Principios de Técnica Lechera* (4 ed.). Barcelona: Reverte: <http://books.google.com.mx/>
- Almécija, M. C., Ibñez, R., Guadix, A., y Guadix, E. M. (2007). Effect of pH on the fractionation of whey proteins with a ceramic ultrafiltration membrane. *Journal of Membrane Science*, 288, 28-35.
- Badui, S. (2006). *Química de los Alimentos* (4 ed.). México: Pearson Educación.
- Battaner, E. (1993). *Biomoléculas*. Recuperado el 5 de Julio de 2012, de Estructura cuaternaria de las proteínas:  
<http://laguna.fmedic.unam.mx/~evazquez/0403/estructura%20terciaria4.html>
- Bello, G. J. (2000). *Ciencia Bromatológica: Principios Generales de los Alimentos*. Madrid: Díaz de Santos: <http://books.google.com.mx/>
- Beristain, F. (2001). Guía rápida del granulómetro de rayo laser Cilas 930 LD. Cuautitlán Izcalli, México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.
- Beverung, C. J., Radke, C. J., & Blanch, H. W. (1999). Effect of extracellular glutamine concentration on primary and secondary metabolism of a murine hybridoma: An in vivo C-13 nuclear magnetic resonance study. *Biotechnology and Bioengineering*, 57 (2), 172-186.
- Bonilla, B. (2011). *Caracterización fisicoquímica y comportamiento al flujo de nanopartículas constituidas por proteína láctea y polisacáridos (xantana y goma arábiga) en medio acuoso*. Tesis. Ingeniería en Alimentos. Cuautitlán Izcalli: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bos, M., y Vliet, T. v. (2001). Interfacial rheological properties of adsorbed protein layers and surfactants: a review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 91, 437-471.
- Bylund, M. G., y Gómez, L. A. (2003). *Manual de Industrias Lácteas*. Madrid: Mundi-Prensa: <http://books.google.com.mx/>

- Cox, A. R., Deborah, A., y Russell, A. B. (2009). Exceptional stability of food foams using class II hydrophobin HFBII. *Food Hydrocolloids*, 23, 366–376.
- Cubero, N., Monferrer, A., y Villalta, J. (2002). *Aditivos Alimentarios*. Madrid: Mundi-Prensa Libros: <http://books.google.com.mx/>
- Dickinson, E., McClements, D. J. (1995). *Advances in Food Colloids*. London: Blackie.
- Fains, A., Bertrand, D., y Baniell, A. (1997). Stability and texture of protein foams: a study by video image analysis. *Food Hydrocolloids*, 11 (1), pp. 63-69.
- Fennema, R. O. (2000). *Química de los Alimentos*. España: Acribia S. A.
- Foegeding, E. A., Luck, P. J., y Davis, J. P. (2006). Factors determining the physical properties of protein foams. *Food hydrocolloids*, 20, 284–292.
- Fuentes, J., y López de Ramos, A. L. (2001). Nuevo método para medir la tensión superficial mediante la técnica de la gota colgante. *Información Tecnológica*, 12 (2), 181-188.
- García Garibay, M., Quintero Ramírez, R., y López-Munguía Canales, A. (1993). *Tecnología Alimentaria*. México, D.F.: Limusa.
- García, M. V. (2010). *Propiedades espumantes de la leche descremada en polvo reforzadas con caseinato de sodio y concentrado de suero de leche*. Tesis. Ingeniería en Alimentos, Cuautitlán Izcalli, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gennaro, A. R. (2003). *Farmacología* (20 ed., Vol. 2). Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana: <http://books.google.com.mx/>
- González, J. (2009). *Guía rápida de Turbiscan MA2000*. Cuautitlán Izcalli, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.
- González, J. M. (2012). *Curso de Biomoléculas*. Recuperado el 20 de Febrero de 2012, de Universidad del País Vasco: <http://www.ehu.es/biomoleculas/cibert.htm>
- Gutiérrez, J. B. (1998). *Ciencia y Tecnología Culinaria*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos: <http://books.google.com.mx/>

- Hemar, Y., Tamehana, P. A., Munro, P. A., y Singh, H. (2001). Viscosity, microstructure and phase behavior of aqueous mixtures of commercial milk protein products and xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 15, 565-574.
- Hernández, A. G. (2010). *Tratado de Nutrición: Composición y Calidad Nutritiva de los Alimentos* (2 ed., Vol. 2). Madrid: Ed. Médica Panamericana: <http://books.google.com.mx/>
- Indrawati, L., Wang, Z., Gonzalez, J., y Narsimhan, G. (2008). Effect of processing parameters on foam formation using a continuous system with a mechanical whipper. *Journal of Food Engineering*, 88, 65-74.
- Jara, F. L. (2011). Impacto de la Incompatibilidad/Compatibilidad Termodinámica entre Proteínas del Lactosuero e Hidroxipropilmetilcelulosa en las Propiedades Físico-Químicas de las Mezclas. *Tesis Doctoral*. Argentina: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Kamath, S., Huppertz, T., Houlihan, A. V., y Deeth, H. C. (2008). The influence of temperature on the foaming of milk. *International Dairy Journal*, 18, 994–1002.
- Kinsella, J. E. (1984). Milk proteins: physicochemical and functional properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 21, 197–262.
- Koleske, J. V. (1995). *Paint and Coating Testing Manual* (14 ed.). Philadelphia: ASTM International: <http://books.google.com.mx/>
- Kraut, S. F. (1998). *Tablas de Composición de Alimentos*. Zaragoza: Acribia.
- Lanore, F. (1995). *Química General: Manual de Prácticas de Laboratorio*. Santo Domingo: INTEC: <http://books.google.com.mx/>
- Lewis, M. J. (1993). *Propiedades Físicas de los Alimentos y de los Sistemas de Procesado*. Zaragoza: Acribia.
- Martínez Padilla, L. P. (2001). Guía rápida del Viscosímetro MC-1- Physica. Cuautitlán Izcalli, México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.
- Miller, R., y Makievski, A. (24 de Abril de 2012). *SINTERFACE Technologies*. Recuperado el 20 de Agosto de 2012, de <http://www.sinterface.com>

- Narchi, I., Vial, C., y Djelveh, G. (2009). Effect of protein–polysaccharide mixtures on the continuous manufacturing of foamed food products. *Food Hydrocolloids*, 23, 188–201.
- Narsimhan, G. (1990). Unsteady state drainage of a standing foam. *Food emulsion and foam: Theory and Practice*, 1, 78-84.
- Nave, C. R. (2010). *HiperFísica*. Recuperado el 2012 de Marzo de 28, de Mecanica de Fluidos: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- Net InterLab S.A.L. (2007). *Net InterLab S.A.L.* Recuperado el 6 de Julio de 2012, de Instrumentación de laboratorio: [http://www.net-interlab.com/archivo\\_apaar/densimetro\\_lab.html](http://www.net-interlab.com/archivo_apaar/densimetro_lab.html)
- Ocampo, R., Ríos, L. A., y Betan, L. A. (2008). *Curso Práctico de Química Orgánica. Enfocado a biología y alimentos*. Caldas: Universidad de Caldas: <http://books.google.com.mx/>
- Paar Physica (2006). Instructor Manual, Rheoplus Software. *Analysis*, 3. Austria, Germany.
- Peretó, J. G., Sendra, R., Pamblanco, M., y Bañó, C. (2007). *Fundamentos de Bioquímica*. Valencia: Ediciones de Universidad de Valencia: <http://books.google.com.mx/>
- Pernell, C. W., Daubert, C. R., y Foedgening, E. A. (2000). Measurement of the yield stress of protein foams by vane rheometry. *Journal of Food Science*, 65 (1), 110-114.
- Ramírez Navas, J. S. (2006). *Introducción a la Reología de los Alimentos*. Cali, Colombia: Ediciones de Universidad del Valle: <http://books.google.com.mx/>
- Rao, M. A. (2007). *Rheology of Fluid and Semisolid Foods: Principles and Applications* (2 ed.). Washington: Springer.
- Rodríguez Patino, J. M., y Pilosof, A. (2011). Protein-polysaccharide interactions at fluid interfaces. *Food Hydrocolloids*, 25, 1925-1937.
- Rodríguez, J. L. (2008). *Emulsiones y Espumas. Sistemas Coloidales en Farmacia*. España: Ediciones de Universidad de Salamanca.

- Romero del Castillo, R., y Mestres, J. (2004). *Productos Lácteos. Tecnología*. Universidad Politécnica de Catalunya: Catalunya: <http://books.google.com.mx/>
- Salager, J., Andérez, J., Forgiarini, A. (1998). “Influencia de la formulación sobre las espumas” (documento pdf) (ref: 11-JUN-05) Cuadernos FIRP (Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos) Universidad de Los Andes (Mérida) Venezuela Disponible en Internet <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S263A.pdf>
- Schramm, L. L., y Green, W. F. (1995). The influence of Marangoni surface elasticity on gas mobility reductions by foams in porous media. *Colloids and Surfaces*, 33, 13-28.
- Schramm, L. S. (2005). *Emulsions, Foams and Suspensions: Fundamentals and Applications*. Germany: Wiley-VCH.
- Secretaría de Economía y Dirección General de Normas. (12 de Septiembre de 2003). Norma Oficial Mexicana 155. *Leche, formula láctea y producto lácteo combinadDenominaciones, especificaciones fisicoquímicas, información comercial, y métodos de prueba*. México.
- Stanley, D. W., Goff, H. D., y Smith, A. S. (1996). Texture-structure relationships in foamed dairy emulsions. *Food Research International*, 29 (1), 1-13.
- Steffe, J. F. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering* (2 ed.). Michigan: Freeman Press.
- Teijón, J. M. (2006). *Fundamentos de Bioquímica Estructural* (2 ed.). Madrid: Tebar: <http://books.google.com.mx/>
- Tolstoguzov, V. (1996). Structure—Property Relationships in Foods. *Macromolecular Interactions in Food Technology*, 2-14. Washington, DC: ACS Symposium Series; American Chemical Society.
- Vega Morales, C. (2006). Diseño de microestructura en crema batida. *Mundo lácteo y cárnico*, 6, 12-18.
- Voet, D., y Voet, J. G. (2006). *Bioquímica* (3 ed.). Montevideo: Ed. Médica Panamericana: <https://www.google.com.mx/>

- Walsh, D. J., Russell, K., y FitzGerald, R. J. (2008). Stabilization of sodium caseinate hydrolysate foams. *Food Research International*, 41, 43-52.
- Walstra, P. (1996). *Dispersed Systems: Basic Considerations*. In O. R. Fennema, *Food chemistry* (3 ed.). New York, NY, USA: Marcel Dekker, Inc.
- Wege, H. A. (2002). Interacciones Físicas en Interfases de Interés Biológico. Estudio Termodinámico y Cinético. *Tesis Doctoral* . Universidad de Granada, España.
- Windhab, E. J. (1995). *Physico-Chemical Aspects of Food Processing*, Rheology in Food Processing. (S. T. Beckett, Ed.) 80-116: <http://books.google.com.mx>
- Wilson, J. D., y Buffa, A. J. (2003). *Física* (5 ed.). México: Pearson Educación.
- Zhao, Q., Zhao, M., Yang, B., y Cui, C. (2009). Effect of xanthan gum on the physical properties and textural characteristics. *Food Chemistry*, 116, 624–628.