



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILÁN

Diseño de una mezcla de proteínas lácteas, polisacáridos y fructanos de agave en una base líquida para malteada

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA EN ALIMENTOS

PRESENTA:

TANIA MONTSERRAT CID DEL PRADO HERNÁNDEZ

Asesoras:

Dra. Laura Patricia Martínez Padilla

I.A. Verónica Romero Arreola



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
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

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

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

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

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

Diseño de una mezcla de proteínas lácteas, polisacáridos y fructanos de agave en una base líquida para malteada.

Que presenta la pasante: Tania Montserrat Cid del Prado Hernández
Con número de cuenta: 414006780 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería en Alimentos

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

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 04 de Diciembre de 2018.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dra. Laura Patricia Martínez Padilla	
VOCAL	I.A. Patricia Muñoz Aguilar	
SECRETARIO	M. en C. Julieta González Sánchez	
1er. SUPLENTE	Dra. Virginia Agustina Delgado Reyes	
2do. SUPLENTE	I.A. Virginia López García	

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

LMCF/cga*

AGRADECIMIENTOS

A mis dos grandes pilares y mayor ejemplo de siempre seguir adelante, mamá y papá, por su cariño y enseñanzas a lo largo de mi vida. A mis hermanos por sus consejos, por nunca dejar de creer en mí y de alentarme a cumplir cada uno de mis sueños.

Los amo, familia.

A mis amigos por todas las experiencias, momentos de diversión, consejos y apoyo mutuo, cada uno a su modo y en su momento aportó un granito de arena a la persona que soy ahora.

A mis asesoras, Dra. Laura Patricia Martínez Padilla e I. A. Verónica Romero Arreola, por guiarme en el desarrollo de este proyecto. A la Dra. Virginia Delgado Reyes, por su dedicación, consejos y asesoría, mi mayor admiración a su persona.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, gracias por ofrecerme la mejor preparación académica, crecimiento personal y sobre todo por hacer posible uno de mis mayores sueños y experiencias, Argentina.

Al Proyecto “Propiedades Reológicas y Funcionales en los Alimentos”, con clave PIAPI1818, dentro del Programa Interno de Apoyo para Proyectos de Investigación de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, cuyo apoyo contribuyó al desarrollo experimental de este proyecto de tesis.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE CUADROS	vi
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	
1.1. Espumas	4
1.1.1. Métodos de formación de espumas	5
1.1.2. Tensoactivos	6
1.1.3. Propiedades de las espumas	9
1.1.4. Estabilidad e inestabilidad de espumas	10
1.2. Formulación de la malteada	13
1.2.1. Leche	15
1.2.2. Concentrado de suero de leche	16
1.2.3. Xantana	17
1.2.4. Glucomanano de konjac	19
1.2.5. Fructanos de agave	22
1.3. Estudios en espumas lácteas	24
1.3.1. Efecto de temperatura	24
1.3.2. Efecto del pH	25
1.3.3. Efecto de la composición química	26

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Objetivos	28
2.2. Materiales	29
2.3. Diseño experimental	29
2.4. Métodos	30
2.4.1. Preparación de la fase líquida	30
2.4.2. Preparación de la espuma	31
2.4.3. Determinación de propiedades de la fase líquida	31
2.4.4. Determinación de propiedades de la espuma	32

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Propiedades de la fase líquida	34
3.1.1. pH	34
3.1.2. Propiedades de flujo	36
3.1.3. Capacidad espumante	47
3.2. Propiedades de la espuma	50
3.2.1. Densidad	50
3.2.2. Estabilidad por drenado gravimétrico	52
3.2.3. Estabilidad por transmisión-retrodispersión de luz	56
3.3. Determinación de la formulación óptima	58

CONCLUSIONES	61
---------------------	----

REFERENCIAS	63
--------------------	----

ANEXO 1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS	67
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Vista microscópica de una espuma	5
Figura 1.2. Estructura típica de una molécula de agente tensoactivo	7
Figura 1.3. Mecanismos de adsorción de los tensoactivos en la interfase	8
Figura 1.4. Representación esquemática de las principales causas de inestabilidad de espumas	11
Figura 1.5. Representación esquemática de una espuma poliédrica	12
Figura 1.6. Modelo conformacional de la micela de caseína	16
Figura 1.7. Representación estructural de la xantana	18
Figura 1.8. Comparación del comportamiento al flujo de xantana con otros hidrocoloides en solución al 0.5%	19
Figura 1.9. Estructura química del glucomanano de konjac	20
Figura 1.10. Efecto de la concentración sobre la viscosidad de soluciones de glucomanano de konjac	21
Figura 1.11. Efecto de la velocidad de cizalla sobre la viscosidad de soluciones de glucomanano de konjac a diferentes concentraciones	21
Figura 1.12. Propuesta de la estructura para fructanos de <i>A. tequilana</i> Weber variedad azul	23
Figura 2.1. Perfiles identificados de transmisión y retrodispersión de luz en espuma	33
Figura 3.1. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de pH en base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones	35
Figura 3.2. Viscosidad en función del tiempo durante el precizallamiento de base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones	36

Figura 3.3. Curvas de flujo de base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones. a) Muestras de baja viscosidad y b) Muestras de alta viscosidad	39
Figura 3.4. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones. a) Muestras de baja viscosidad y b) Muestras de alta viscosidad	40
Figura 3.5. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de esfuerzo de cedencia en base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones	43
Figura 3.6. Gráfica de contorno de esfuerzo de cedencia de los sistemas con respecto a su concentración de concentrado de suero de leche (CSL) y proporción de polisacáridos (GX-GMK)	43
Figura 3.7. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de índice de consistencia en base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones	45
Figura 3.8. Gráfico de superficie de índice de consistencia de los sistemas con respecto a su concentración de concentrado de suero de leche (CSL) y proporción de polisacáridos (GX-GMK)	45
Figura 3.9. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de índice de consistencia en base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones	46
Figura 3.10. Gráfico de superficie de índice de comportamiento al flujo de los sistemas con respecto a su concentración de concentrado de suero de leche (CSL) y proporción de polisacáridos (GX-GMK)	47
Figura 3.11. Gráfico de superficie de capacidad espumante de los sistemas con respecto a su concentración de concentrado de suero de leche (CSL) y proporción de polisacáridos (GX-GMK)	48
Figura 3.12. Gráfico de superficie de capacidad espumante de los sistemas con respecto a su concentración de concentrado de suero de leche (CSL) y fructanos de agave (FA)	49

Figura 3.13. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para densidad de espumas obtenidas a partir de base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones	52
Figura 3.14. Volumen de líquido drenado en función del tiempo en espumas obtenidas a partir de base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones	54
Figura 3.15. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para velocidad de drenado de espumas obtenidas a partir de base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones	55
Figura 3.16. Gráfico de superficie de velocidad de drenado de espumas con respecto a su concentración de concentrado de suero de leche (CSL) y fructanos de agave (FA)	56
Figura 3.17. Comportamiento observado del perfil de retrodispersión durante la cinética de aumento de tamaño de burbuja en espumas con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones	57
Figura 3.18. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para velocidad de maduración de Ostwald en espumas obtenidas a partir de base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones	58
Figura 3.19. Gráfico de optimización con base en propiedades de flujo y estabilidad de espuma obtenida de base líquida de malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK)	59

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1.1. Componentes principales de la formulación de producto comercial “Slim Fast”	14
Cuadro 1.2. Formulación de la base para malteada propuesta	14
Cuadro 2.1. Diseño experimental para superficie de respuesta	29
Cuadro 3.1. pH de la fase líquida elaborada a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones, y del producto comercial de referencia, evaluadas a $19\pm 1^{\circ}\text{C}$	34
Cuadro 3.2. Viscosidad evaluada durante el precizamiento de la fase líquida elaborada a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones y del producto comercial de referencia	37
Cuadro 3.3. Parámetros del modelo Herschel-Bulkley para producto comercial y fase líquida a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones	42
Cuadro 3.4. Capacidad espumante de fase líquida preparada a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones y del producto comercial de referencia	50
Cuadro 3.5. Densidad de las espumas obtenidas a partir de muestras preparadas a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones y del producto comercial de referencia	51
Cuadro 3.6. Tiempo de drenado de las espumas obtenidas a partir de muestras preparadas a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones	53

Cuadro 3.7. Velocidad de drenado en espumas preparadas a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones	54
Cuadro 3.8. Velocidad de maduración de Ostwald evaluada como disminución de la retrodispersión de la luz en espumas preparadas a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones y de un producto comercial	57
Cuadro 3.9. Medias pronosticadas e intervalos de predicción correspondientes a la formulación óptima de malteada a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones y de un producto comercial	60
Cuadro 4.1. Análisis de Varianza de una vía y prueba de Tukey para pH de la fase líquida	67
Cuadro 4.2. Agrupación por el método de Tukey y una confianza de 95% para pH de la fase líquida	67
Cuadro 4.3. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para pH de la fase líquida	68
Cuadro 4.4. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para viscosidad de la fase líquida al inicio del precizamiento	69
Cuadro 4.5. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para esfuerzo de cedencia de la fase líquida	70
Cuadro 4.6. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para índice de consistencia de la fase líquida	71
Cuadro 4.7. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para índice de comportamiento al flujo de la fase líquida	72
Cuadro 4.8. Análisis de Varianza de una vía y prueba de Tukey para capacidad espumante de la fase líquida	73
Cuadro 4.9. Agrupación por el método de Tukey y una confianza de 95% para capacidad espumante de la fase líquida	73
Cuadro 4.10. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para capacidad espumante de la fase líquida	74
Cuadro 4.11. Análisis de Varianza de una vía y prueba de Tukey para densidad de la espuma	75

Cuadro 4.12. Agrupación por el método de Tukey y una confianza de 95% para densidad de la espuma	75
Cuadro 4.13. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para densidad de la espuma	76
Cuadro 4.14. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para drenado de los primeros 2 mL de espuma	77
Cuadro 4.15. Análisis de Varianza de una vía y prueba de Tukey para velocidad de drenado de la espuma	78
Cuadro 4.16. Agrupación por el método de Tukey y una confianza de 95% para velocidad de drenado de la espuma	78
Cuadro 4.17. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para velocidad de drenado de la espuma	79
Cuadro 4.18. Análisis de Varianza de una vía y prueba de Tukey para velocidad de maduración de Ostwald de la espuma	80
Cuadro 4.19. Agrupación por el método de Tukey y una confianza de 95% para velocidad de maduración de Ostwald de la espuma	80
Cuadro 4.20. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para velocidad de maduración de Ostwald de la espuma	81

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el objetivo de estudiar la estabilidad y propiedades de espumas obtenidas de una base líquida para malteada con concentrado de suero lácteo al 5, 7.5 y 10%, adicionada con fructanos de agave a las mismas concentraciones, empleando xantana y glucomanano de konjac en diferentes proporciones (manteniendo una concentración constante de 0.2%), con la finalidad de aumentar la viscosidad de la fase fluida, y así determinar, a través de un diseño estadístico de superficie de respuesta, la concentración óptima de polvos que garantice una mayor estabilidad a la espuma obtenida tras el batido. Se evaluaron los parámetros reológicos y capacidad espumante de la fase fluida para establecer su relación con la estabilidad de las espumas. Se demostró que el incremento en la concentración de concentrado de suero de leche (CSL) aumentó el índice de comportamiento al flujo de la fase líquida, que se comportó como un fluido Herschel-Bulkley. En cuanto a la capacidad espumante, ésta fue favorecida con una mayor proporción de glucomanano de konjac. La estabilidad de las espumas se evaluó mediante su seguimiento por el método de transmisión-retrodispersión de la luz, así como del volumen drenado en función del tiempo, además de determinar la densidad de cada una.

INTRODUCCIÓN

La formación de espumas consiste en dispersar y estabilizar una fase gaseosa en forma de pequeñas gotas en una matriz sólida o semisólida continua para conferir una estructura aireada al alimento y distribución más uniforme del sabor. Esta operación ha sido aplicada para el desarrollo de nuevos productos alimenticios adaptados a las necesidades y gustos del consumidor (Narchi et al., 2009; Badui, 2006; Walstra, 2003). Una malteada es una bebida fría de consistencia poco fluida, elaborada principalmente a base de helado, leche y azúcar cuya principal característica es la presencia de espuma obtenida por un proceso mecánico de batido.

Además de las características sensoriales, en los últimos años, ha aumentado la exigencia del consumidor, propiciando el desarrollo de alimentos funcionales. Investigaciones al respecto se han enfocado a los fructanos, carbohidratos no reductores formados por unidades fructosil que generalmente presentan una molécula de glucosa terminal; estos carbohidratos de reserva en plantas como *Agave tequilana*, no son hidrolizados por enzimas del organismo humano, posibilitando su paso intacto por el sistema digestivo para servir de sustrato energético de algunas bacterias del intestino grueso, considerándose entonces como un prebiótico (Sosa-Herrera y Delgado-Reyes, 2016). Sin embargo, su alto contenido de grupos hidroxilo favorece la formación de puentes de hidrógeno, que puede influenciar la solubilidad de otras moléculas presentes dentro del sistema, propiciando así una competencia por el agua como disolvente (Meyer y Blaauwhoed, 2009).

Por su parte, la leche y sus derivados son especialmente ricos en proteínas y calcio de fácil asimilación, importantes para el mantenimiento de la masa ósea y

muscular (Aranceta y Serra, 2004). Las proteínas de suero de leche son reconocidas por su alto aporte nutricional además de tener una fuerte tendencia de adsorción interfacial, brindando características espumantes y estabilizantes (Fennema, 2010; Huppertz, 2010). La estabilidad influye en la apariencia, y por lo tanto la percepción de calidad en el consumidor. Ésta puede ser favorecida por la adición de polisacáridos como xantana o glucomanano de konjac, mediante el control de la reología de la fase fluida, generando altas viscosidades a bajas concentraciones, la cual se reduce a medida que aumenta la velocidad de cizalla, reflejando su carácter fluidificante, más notable en dispersiones de alta concentración en dichas condiciones de cizalla (Phillips y Williams, 2009).

Estudios realizados en espumas a base de leche en polvo fortificada con concentrado de suero de leche demuestran que un aumento en la concentración de proteínas lácteas se ve reflejado en el incremento de la viscosidad de la fase acuosa, favoreciendo la capacidad espumante de las mezclas y la obtención de espumas más resistentes al drenado (Martínez- Padilla et al., 2014). En otro estudio, Dolores- Becerra (2017) evaluó el empleo de fructanos de agave en espumas a base de concentrado de suero de leche y xantana, los que mostraron ser una mezcla apropiada de biopolímeros para la formación de espumas estables, donde la viscosidad de la fase acuosa aumentó al incrementar su concentración; permitiendo la estabilización de las espumas formadas, al disminuir el movimiento de las burbujas de aire dispersas en el seno del líquido y la velocidad de difusión del aire de éstas. La adición de fructanos de agave en los sistemas representó un aumento en la densidad de las espumas obtenidas con respecto a su concentración, disminuyendo además el rendimiento volumétrico.

De este modo, el presente trabajo plantea la elaboración y optimización de una base líquida para malteada donde las proteínas de leche dominen el comportamiento espumante del producto y cuya mezcla con polisacáridos espesantes brinden estabilidad a la espuma obtenida, además de la adición de fructanos de agave, que permitirá la diversificación de productos funcionales.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. Espumas

Una malteada es una bebida fría de consistencia poco fluida, principalmente elaborada a base de helado, leche y azúcar cuya principal característica es la presencia de espuma obtenida por un proceso mecánico de batido.

La espuma característica de una malteada no involucra una incorporación completa del líquido, contrario a lo que ocurre en otros productos, por ejemplo el merengue, mousse o crema batida, por lo que resulta ser de menor volumen además de tener una mayor fluidez. El principal reto en el desarrollo de este tipo de productos es la estabilidad de dicha espuma, la cual se ve favorecida mediante el aumento en la viscosidad de la fase acuosa, logrado principalmente con la adición de polisacáridos.

Las espumas son dispersiones coloidales de un gas o mezcla de gases suspendidos en una fase dispersante formada por un líquido viscoso o un semisólido. En la mayoría de las espumas alimenticias el gas es aire. El líquido rodea a las burbujas de aire separándolas una de otra mediante una barrera llamada lamela. El diámetro de las burbujas varía en tamaño desde 1 μm hasta varios cm, cuya estructura se visualiza en la Figura 1.1 (Badui, 2006).

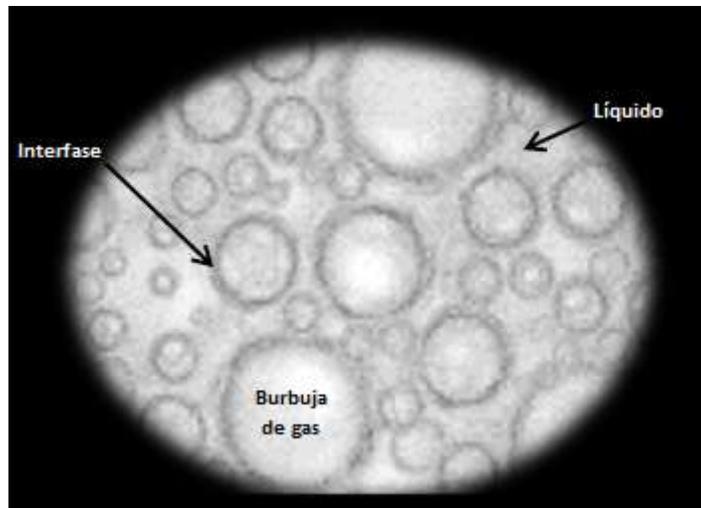


Figura 1.1. Vista microscópica de una espuma (Dolores-Becerra, 2017).

1.1.1. Métodos de formación de espumas

Los requisitos para la formación de espuma incluyen un gas, agua, un tensoactivo o surfactante y energía. El tensoactivo o surfactante se requiere para reducir la tensión superficial entre el gas y el agua y, de este modo, facilitar la formación de pequeñas burbujas de gas, mientras que la energía es necesaria para superar la energía libre interfacial del sistema, que se incrementa en la formación de espuma debido a la ampliación de la superficie (Kinsella 1981; Walstra 2003).

Las espumas se pueden obtener mediante dos vías, sobresaturación o mecánicamente (Fennema, 2010):

a) Sobresaturación

Se disuelve un gas, generalmente dióxido de carbono (CO_2) por su alta solubilidad, en un líquido, a alta presión. Tras liberar la presión se forman burbujas de gas, que crecen a partir de pequeñas bolsas de aire presentes en la pared del recipiente o en pequeñas piezas añadidas para facilitar la ebullición. El ángulo de contacto gas- agua- sólido puede alcanzar hasta 150° en un sólido razonablemente hidrófobo, lo que permitirá la “permanencia” de pequeñas burbujas de aire en las hendiduras del sólido.

b) Aplicación de fuerzas mecánicas

A través de pequeños orificios se inyecta una corriente de gas en la fase acuosa. Se producen así burbujas de gran tamaño. Se pueden obtener burbujas más pequeñas incorporando aire en el líquido. La fuerza mecánica aplicada puede ser mediante un proceso de agitación. En la formación de espumas por agitación se transfiere energía mecánica a la interfase gas-agua, como resultado de lo cual pueden formarse burbujas en el producto. La agitación conduce normalmente a la formación inicial de burbujas de aire comparativamente grandes, que pueden ser disgregadas en otras más pequeñas. A menudo, todo el líquido no logra ser incorporado en la espuma mediante batido o inyección de aire, permaneciendo una parte de éste en el inferior de la espuma. Durante el batido, se produce una expansión y compresión frecuentes de las superficies de la película, lo que puede provocar fácilmente un fuerte despliegue y posterior agregación de proteínas globulares (Kinsella, 1981; Walstra, 2003).

Generalmente, las espumas solas como tal no son estables sin la adición de otros agentes estabilizantes, comúnmente polisacáridos. Éstos en mezcla con proteínas u otros polisacáridos, generalmente presentan sinergismo (McClements, 2006).

1.1.2. Tensioactivos

Los tensioactivos son moléculas caracterizadas por la posesión de dos partes de naturaleza opuesta, una polar y otra apolar. La parte polar o hidrófila de la molécula puede llevar una carga positiva o negativa, y es ésta parte la que define al agente tensioactivo como catiónico o aniónico respectivamente. Otros agentes tensioactivos en cambio, no muestran carga iónica, por ejemplo algunos alcoholes y éteres. La estructura de los agentes tensioactivos, presentada en la Figura 1.2, permite su adsorción en las interfases, formar agregados y autoasociarse en soluciones acuosas. La parte apolar o hidrófoba de la molécula generalmente suele ser una cadena longitudinal de hidrocarburos (Aranberri et al., 2006).

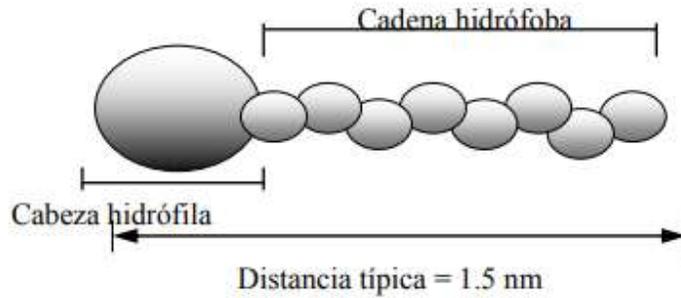


Figura 1.2. Estructura típica de una molécula de agente tensoactivo (Aranberri et al., 2006).

Debido a la baja solubilidad de las cadenas de los hidrocarburos en el agua, los agentes tensoactivos tienden a minimizar la interfase o la superficie de contacto agua-hidrocarburos en la disolución acuosa. Para ello, existen dos posibles mecanismos, ilustrados en la Figura 1.3:

A bajas concentraciones de agente tensoactivo, las moléculas se acumulan en la interfase agua-aire, de manera que la parte hidrófoba pueda quedar fuera del medio acuoso mientras que la parte hidrófila se mantiene inmersa en el agua. Sin embargo, por encima de la concentración micelar crítica (CMC), la interfase es ocupada completamente por moléculas de agentes tensoactivos que se asocian formando agregados, denominados micelas, cuya forma y tamaño varían en función de la concentración y naturaleza del tensoactivo.

La interacción entre las cadenas de hidrocarburo y el agua de la disolución se minimiza gracias a la formación de estas estructuras tridimensionales, donde las cadenas apolares se dirigen hacia el centro del agregado y las cabezas polares hacia la disolución (Aranberri et al., 2006).

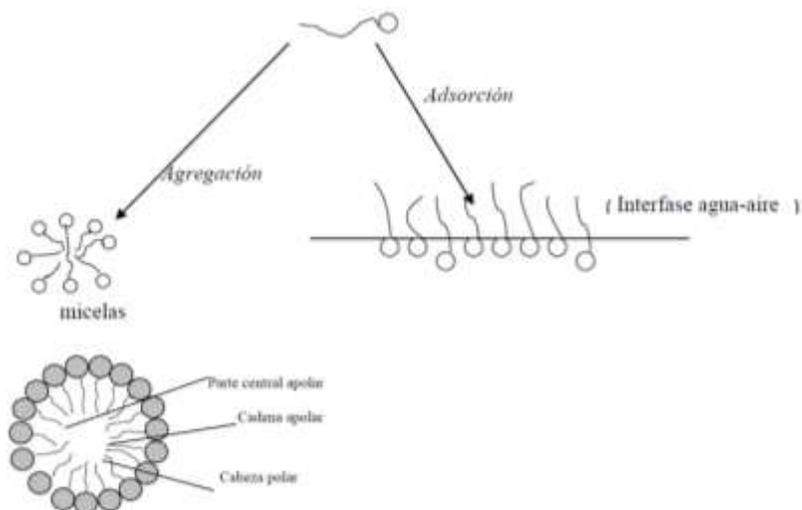


Figura 1.3. Mecanismos de adsorción de los tensoactivos en la interfase (Aranberri et al., 2006).

Los surfactantes producen varios efectos (Fennema, 2010):

- a) Disminución de la presión de Laplace debido al descenso de la tensión superficial, facilitando la deformación de la interfase, que resulta importante en la formación de emulsiones, espumas y en la prevención de la coalescencia.
- b) Disminuyen la energía libre interfacial, lo que disminuye proporcionalmente la maduración de Ostwald.
- c) La presencia de surfactantes permite la creación de gradientes de tensión superficial, esencial para la formación y estabilidad de emulsiones, así como de espumas.
- d) La adsorción de surfactantes sobre las partículas puede modificar considerablemente las fuerzas interpartículas, generalmente incrementando la repulsión y, por lo tanto, la estabilidad.

Una forma de clasificación de los tensoactivos es con base en su peso molecular. Los tensoactivos de bajo peso molecular, en fase acuosa pueden formar diversas estructuras de asociación, que pueden ser de naturaleza micelar e incluso líquido-cristalina. En la interfase, forman capas monomoleculares, aunque en ciertas

condiciones pueden formar multicapas, generando un aumento en la viscoelasticidad que, a su vez, favorece la formación y estabilidad del sistema coloidal (Muñoz y Alfaro, 2000).

Por su parte, los tensoactivos de alto peso molecular, para ejercer su función siguen un mecanismo en tres etapas. La primera consiste en su transporte convectivo desde la fase continua a la interfase, la segunda en su adsorción en la interfase y la tercera en una reorganización de su estructura en la interfase para optimizar las interacciones hidrófobas e hidrófilas en esta zona, que recibe el nombre de desnaturalización superficial (Hill, 1998).

Como ejemplos de tensoactivos de bajo peso molecular se pueden citar los lípidos polares, glicolípidos, y como tensoactivos de alto peso molecular a las proteínas, principalmente las de origen lácteo, reconocidas como ingredientes de alto aporte nutricional, además de exhibir propiedades espumantes y estabilizantes (Narchi et al., 2009).

1.1.3. Propiedades de las espumas

El rendimiento es una variable importante en la fabricación de espumas y se refiere al volumen de aire incorporado, del cual depende estrechamente la densidad de la espuma. El rendimiento incrementa con la disminución de la densidad de la espuma y se asocia comúnmente con espumas más voluminosas. El rendimiento se calcula generalmente como la diferencia de densidad entre la fase acuosa y la espuma, dividida por la densidad de la espuma. En la práctica, las densidades se reemplazan generalmente por el volumen dado de líquido y espuma (Huppertz, 2010). Esta propiedad es resultado de varios procesos durante el batido: formación de burbujas, drenado y coalescencia de burbujas. Se crea generalmente una espuma poliédrica; formándose una red continua a través de la cual puede drenarse el líquido. El drenado causa separación entre la espuma y el líquido (Walstra, 2003).

El poder espumante generalmente aumenta con la concentración de proteína hasta un valor máximo. Esto se ve afectado por el método que se utilice para formar la espuma (Badui, 2006). Las propiedades finales de las espumas dependen no sólo de su fracción de gas, es decir, de la saturación, y de su distribución de tamaño de burbuja, sino también de su microestructura y particularmente de la distribución de componentes (Narchi et al., 2009).

Por su parte, la distribución de tamaño de las burbujas de aire en la espuma se ve afectada por el método y la intensidad de formación. Ésta es evaluada más comúnmente mediante microscopía acoplada con técnicas de análisis de imagen adecuadas. Además, la determinación del tamaño de la burbuja de aire como función del tiempo de almacenamiento puede dar una idea de la resistencia de la espuma a la desproporción y coalescencia (Huppertz, 2010).

1.1.4. Estabilidad e inestabilidad de espumas

La estabilidad de la espuma se refiere a su capacidad para retener su volumen en función del tiempo en condiciones de almacenamiento definidas. Una medida comúnmente usada para expresar la estabilidad de la espuma es la llamada vida media de la espuma, que refleja el tiempo requerido para que la espuma se reduzca a la mitad de su volumen original. Las disminuciones en el volumen de espuma se producen como resultado de distintos fenómenos de inestabilidad (Huppertz, 2010).

Esquematizadas en la Figura 1.4, las espumas pueden presentar tres causas principales de inestabilidad (Fennema, 2010):

- a) Maduración de Ostwald
- b) El drenado de líquido de (y a través de) la capa de espuma
- c) La coalescencia

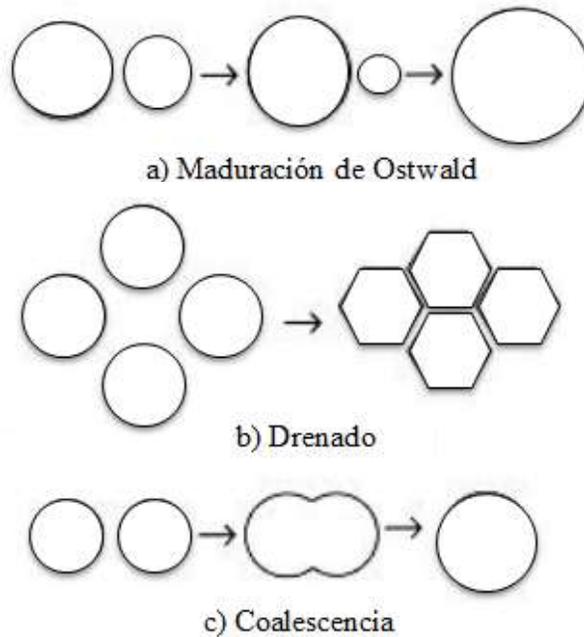


Figura 1.4. Representación esquemática de las principales causas de inestabilidad de espumas (Phillips y Williams, 2009).

Estos efectos son, en cierto grado, interdependientes: el drenado puede promover la coalescencia y la maduración de Ostwald o la coalescencia puede afectar a la velocidad de drenado.

a) Maduración de Ostwald

Se refiere a la difusión de gas desde las burbujas más pequeñas a las mayores, a la atmósfera o hacia el líquido, provocando desproporción de tamaño de burbuja. Este proceso se debe a que la presión interna de las burbujas (presión de Laplace) es mayor en las gotas más pequeñas que en las de mayor tamaño y ocurre a una velocidad que es función de la solubilidad de la fase dispersa en la fase continua. La solubilidad relativamente alta del aire en el agua produce una maduración de Ostwald rápida, llamada frecuentemente “desproporción”. Minutos después de su formación, puede observarse que la espuma presenta burbujas muy grandes. Este fenómeno es más rápido en la parte superior de la capa de espuma, porque el aire puede difundir directamente a la atmósfera, y la capa de agua que separa las burbujas de la atmósfera es muy fina (Walstra, 2003).

b) Drenado

El drenado se refiere al flujo de líquido a través de los espacios intersticiales, este determina que las burbujas esféricas, al entrar en contacto, adquieran una forma poliédrica (Figura 1.5). Donde se reúnen tres laminillas se acumula un volumen de agua con forma de prisma rodeado por superficies cilíndricas. Las pequeñas burbujas residuales suelen desaparecer por la maduración de Ostwald. De este modo, se forma una espuma poliédrica relativamente regular de estructura parecida a la de un panal de miel (Fennema, 2010).

La presión de Laplace en los acúmulos de agua de forma prismática rodeados de superficies cilíndricas es menor que en las laminillas y por ello fluye líquido a los mismos. Como estas estructuras están interconectadas, representan rutas a través de las cuales drena el líquido por acción de la fuerza de gravedad. A medida que la espuma sigue drenando, la fracción de volumen de aire aumenta. La velocidad de drenado es función de la viscosidad, la cual a su vez es función de la temperatura del sistema (Fennema, 2010).

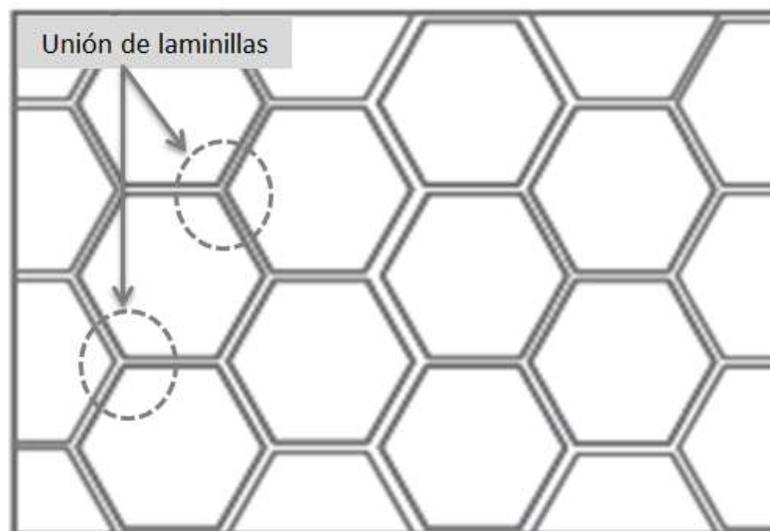


Figura 1.5. Representación esquemática de una espuma poliédrica (Huppertz, 2010).

c) Coalescencia

La coalescencia es la unión irreversible de burbujas de aire formando nuevas burbujas de mayor tamaño. Este fenómeno se debe a la inestabilidad de la película que separa las burbujas de aire y su mecanismo difiere según las circunstancias (Fennema, 2010).

La coalescencia de burbujas de gas se produce rápidamente para minimizar el área superficial, pero la formación de una película en la interfase con proteínas proporciona una barrera adecuada para evitar dicho suceso. La susceptibilidad de la película al colapso, así como la coalescencia de las burbujas de aire incrementa con el descenso de las propiedades reológicas de la película. Idealmente, las proteínas forman una película viscoelástica cohesiva, que es deformable y es estable a un adelgazamiento localizado. La capacidad espumante se ve disminuida por la coalescencia inmediata de las burbujas en la parte superior de la espuma (Dickinson y Walstra, 1993; Walstra, 2003).

1.2. Formulación de la malteada

Las malteadas generalmente son bebidas a base de leche que emplean helado dentro de sus ingredientes principales, con lo cual el contenido proteínico aumenta; estas proteínas lácteas actúan como agente espumante dentro del sistema, así, aunadas a la disminución de temperatura, garantizan la formación de la espuma.

En cuanto a las malteadas comerciales o polvos base para este tipo de bebidas batidas, además del contenido de azúcares, se incorporan polisacáridos, principalmente xantana, con el objetivo de aumentar la viscosidad de la fase fluida para así lograr una espuma más estable.

Uno de los productos similares, que se encuentran actualmente en el mercado, es una mezcla de polvos denominada "Slim Fast"; la cual se seleccionó para su

posterior comparación con el producto propuesto, debido a sus propiedades espumantes y de estabilidad favorables, cuyos componentes principales de su formulación se presentan en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1. Componentes principales de la formulación de producto comercial “Slim Fast”.

<i>Ingrediente</i>
Fructosa
Cocoa
Concentrado de suero de leche
Concentrado de proteína de soya
Goma arábica
Gel de celulosa
Leche descremada en polvo
Celulosa en polvo
Goma guar
Lecitina de soya
Carragenina
Almidón modificado de maíz
Goma xantana
Maltodextrina

Con base en la información anterior, se realizó una selección de ingredientes para el desarrollo de la base para malteada propuesta (Cuadro 1.2). A continuación se describen las características principales de los ingredientes seleccionados que repercuten en las propiedades funcionales desde el punto de vista tecnológico.

Cuadro 1.2. Formulación de la base para malteada propuesta.

<i>Ingrediente</i>	<i>Porcentaje empleado (%m/m)</i>
Leche entera, pasteurizada de vaca	79.8 – 89.8
Concentrado de suero de leche	5 – 10
Fructanos de agave	5 – 10
Xantana	0.05 – 0.15
Glucomanano de konjac	0.05 – 0.15

1.2.1. Leche

La leche de vaca contiene alrededor del 3.5% en peso de proteína, que representa aproximadamente el 38% del contenido total de sólidos no grasos de la leche. Del total de contenido proteínico en la leche de vaca, aproximadamente el 80% es caseína y el 20% es proteína de suero, que pueden ser definidas por su composición química y propiedades físicas (Miller et al., 2000).

La caseína es la proteína dominante en la leche de vaca, su papel nutrimental es el suministro de aminoácidos esenciales, es fuente de calcio, fósforo y riboflavina (vitamina B12), contribuye significativamente a los requerimientos de vitamina A y B1 (tiamina). Generalmente precipita a un pH de 4.6 y puede fraccionarse electroforéticamente en cuatro componentes principales: α , β , κ y γ caseínas, que se distinguen entre sí por su composición de aminoácidos y propiedades funcionales. Las caseínas en la leche fluida se encuentran suspendidas formando micelas de complejos macromoleculares de fosfoproteínas y glucoproteínas (Phillips y Williams, 2009).

Todas las caseínas individuales, con excepción de la κ -caseína (Figura 1.6), muestran una fuerte tendencia de absorción en las interfases, debido a su naturaleza anfifílica, que también influye en la estabilidad de las micelas de caseína (Phillips y Williams, 2009).

La β -caseína es típicamente seleccionada por su estructura desordenada y propiedades hidrófobas, siendo capaz de reducir rápidamente la tensión en la interface recién formada del fluido. Por otro lado, la β -lactoglobulina es comúnmente conocida por su estructura globular ordenada que actúa formando una estructura viscoelástica empaquetada en la interfase aire-agua (Martínez-Padilla et al., 2014).

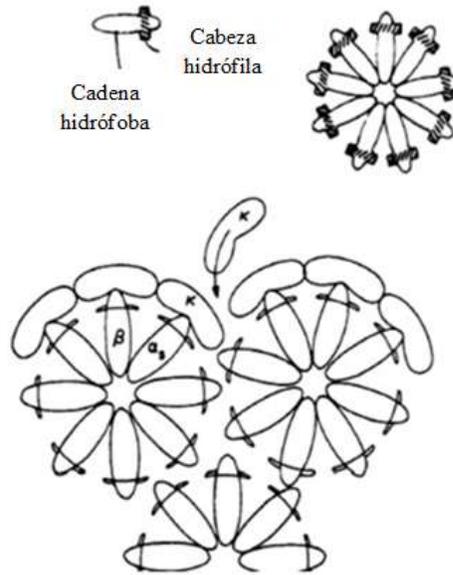


Figura 1.6. Modelo conformacional de la micela de caseína (Ferrandini et al., 2006)

1.2.2. Concentrado de suero de leche

El concentrado de suero de leche se obtiene por medio de la ultrafiltración del líquido obtenido durante la elaboración del queso o productos similares, mediante la separación de la cuajada, después de la coagulación de las proteínas de la leche y/o los productos derivados de ésta (Parra, 2009).

Las proteínas de suero de leche, conocidas también como seroproteínas, se consideran proteínas solubles de alto valor biológico que cuentan con un amplio perfil de aminoácidos. Se clasifican principalmente en albúminas y globulinas, entre las que se incluyen α -lactoalbúminas, β -lactoglobulinas, inmunoglobulinas, proteasas-peptonas y otros compuestos nitrogenados minoritarios no específicos como lactoferrina y lisozima. Las seroproteínas son consideradas proteínas de alto valor biológico que cuentan con un amplio perfil de aminoácidos (Phillips y Williams, 2009).

La β -lactoglobulina es el componente proteínico principal, la cual representa el 50% de las proteínas presentes en el suero, pertenece a la familia de las lipocalinas, que se caracterizan por su tendencia a unirse con moléculas hidrofílicas. Su contenido de residuos de leucina, isoleucina y valina le proporcionan regiones fuertemente hidrofóbicas (Phillips y Williams, 2009).

Industrialmente, las proteínas del suero de leche se utilizan en la fabricación de fórmulas infantiles, alimentos para deportistas y como fuente de aminoácidos de cadena ramificada (leucina, isoleucina, valina) para las fórmulas especializadas (Miller et al., 2000).

1.2.3. Xantana

La xantana es un heteropolisacárido aniónico extracelular secretado por el microorganismo *Xanthomonas campestris* con un considerable valor práctico. La xantana es soluble incluso en agua fría. La viscosidad de sus dispersiones es estable en un amplio intervalo de pH y temperatura, además de ser resistente a la degradación enzimática. A pesar de su alta viscosidad en reposo (o a bajas velocidades de cizalla) tiene capacidad para proporcionar estabilidad a largo plazo a sistemas coloidales (Narchi et al., 2009; Phillips y Williams, 2009; Pasquel, 2001).

El uso creciente de xantana se debe a diferentes tipos de interacciones que responden a su estructura y a la configuración de doble hélice de la estructura secundaria. La estructura primaria (Figura 1.7) consiste en una cadena principal de celulosa unida una cadena lateral compuesta por unidades trisacárido (una unidad de ácido D-glucurónico entre dos unidades D-manosa). Una unidad de D-manosa contiene un grupo acetilo y la otra contiene un resto de ácido pirúvico (Brunchi et al, 2016; Phillips y Williams, 2009).

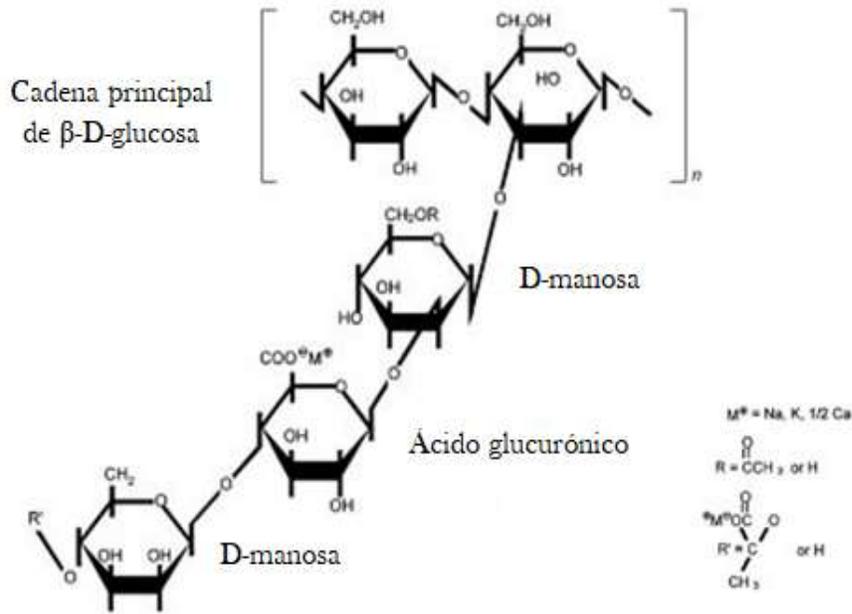


Figura 1.7. Representación estructural de la xantana (Phillips y Williams, 2009).

Las disoluciones de xantana son altamente fluidificantes. Cuando aumenta el esfuerzo de cizalla, la viscosidad se reduce progresivamente, pero al retirar el cizallamiento, la viscosidad inicial se recupera casi de forma instantánea. Este comportamiento es resultado de la capacidad de las moléculas de xantana, en solución, de formar agregados intermoleculares mediante puentes de hidrógeno y entrecruzamientos poliméricos. Esta red altamente ordenada de moléculas rígidas entrecruzadas da como resultado una alta viscosidad a bajas velocidades de cizalla. Estos agregados se rompen progresivamente bajo la influencia del cizallamiento aplicado, proporcionando su carácter altamente fluidificante. Al ser sometidas a bajas velocidades de cizalla presentan una viscosidad significativamente más alta que la de disoluciones preparadas con otros hidrocoloides comunes, al evaluar el comportamiento de hidrocoloides a velocidades relativas a funciones o procesos específicos se ha observado que por encima de 100 s^{-1} la viscosidad de las dispersiones de goma de xantana cae bruscamente en comparación con las otras gomas que facilitan el vertido, bombeo o pulverización (Phillips y Williams, 2009), tal como se muestra en la Figura 1.8.

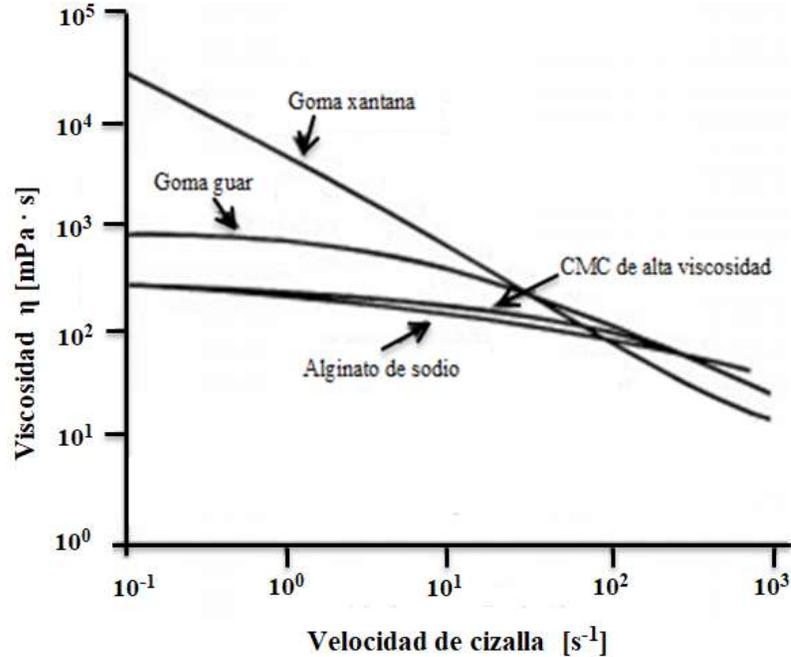


Figura 1.8. Comparación del comportamiento al flujo de xantana con otros hidrocoloides en solución al 0.5% (Phillips y Williams, 2009).

Por su parte, la microestructura y la reología de las mezclas de proteína-xantana difieren dependiendo de la concentración de polisacárido y del tipo de proteína (Martínez-Padilla et al., 2015).

1.2.4. Glucomanano de konjac

El glucomanano de konjac (GMK) es un heteropolisacárido neutro derivado del tubérculo *Amorphophallus konjac*, herbácea originaria de China y Vietnam. Está compuesto por D-manosa y D-glucosa, unidas por enlaces β -1,4; la relación de manosa y glucosa es de 1.6:1 (Yoshimura y Nishinari, 1999). Su estructura se muestra en la Figura 1.9.

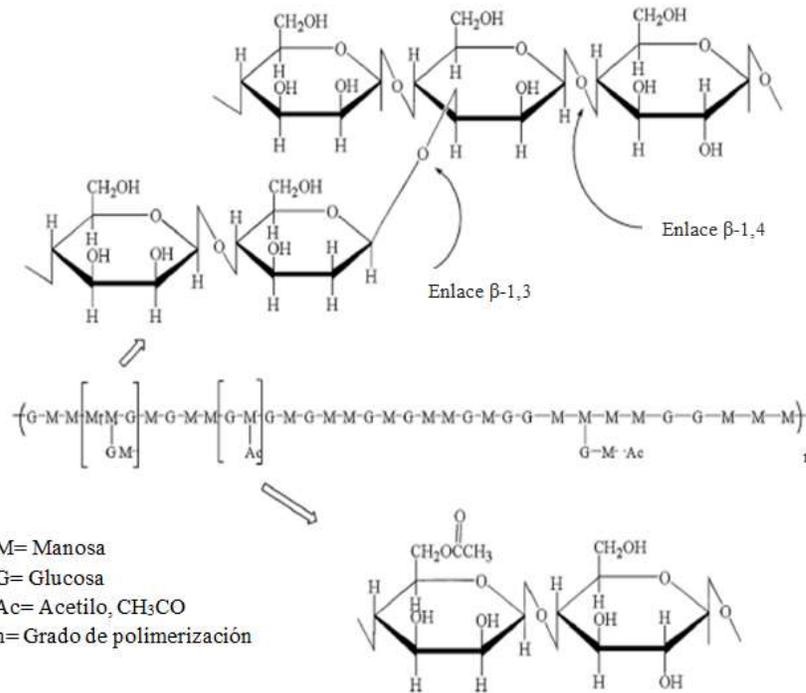


Figura 1.9. Estructura química del glucomanano de konjac (Zhang et al., 2014).

En cuanto a su comportamiento en solución acuosa (Figura 1.10), cuando la concentración del polisacárido es inferior al 0.30%, el cambio de la viscosidad con la concentración es menos notable, sin embargo, su viscosidad aumenta drásticamente cuando la concentración es superior al 0.30% (Wang et al., 2008).

Por otro lado, la viscosidad de sistemas acuosos de glucomanano de konjac se reduce a medida que aumenta la velocidad de cizalla, lo que refleja su carácter fluidificante (Figura 1.11), que es más notable conforme la concentración aumenta (Wang et al., 2008).

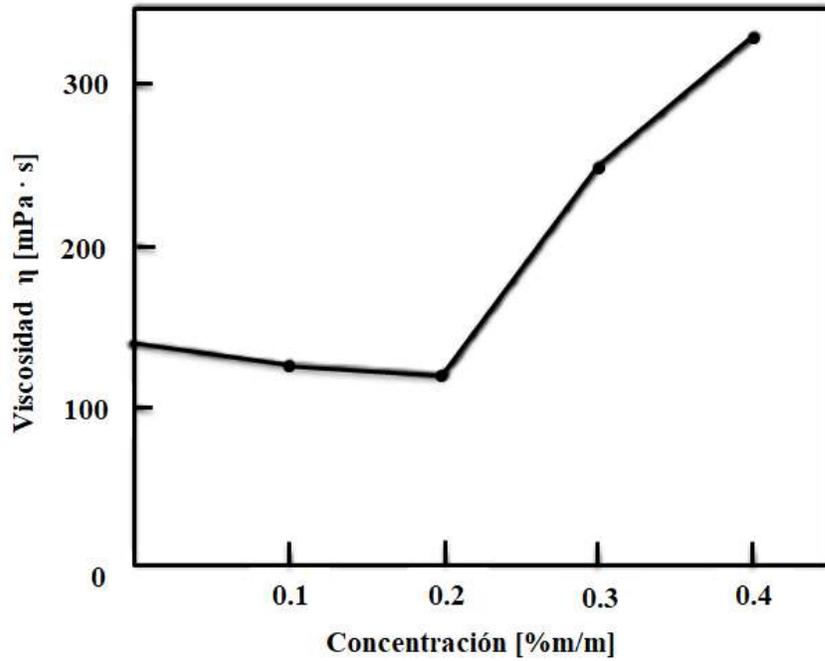


Figura 1.10. Efecto de la concentración sobre la viscosidad de soluciones de glucomanano de konjac (Wang et al., 2008).

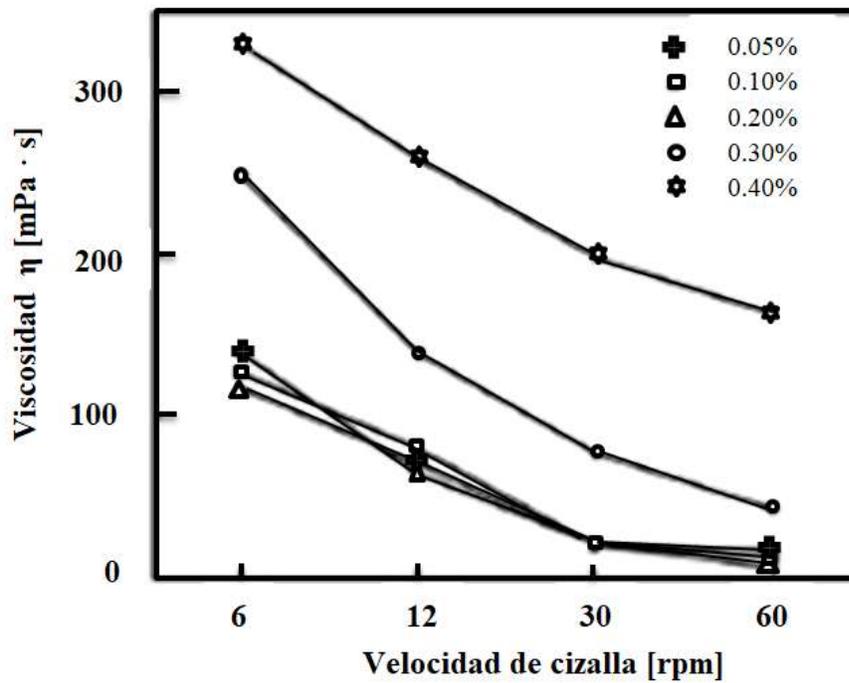


Figura 1.11. Efecto de la velocidad de cizalla sobre la viscosidad de soluciones de glucomanano de konjac a diferentes concentraciones (Wang et al., 2008).

Estudios han demostrado la capacidad del glucomanano de konjac para reducir significativamente el colesterol en el plasma, ayudando en la prevención de enfermedades cardiovasculares. Aunque el glucomanano no se hidroliza por las enzimas del tracto gastrointestinal humano, sí es desdoblado en el colon por las enzimas bacterianas, con esto se ha estudiado también su uso como prebiótico, demostrando que su ingesta diaria aumenta la población de bacterias lácticas en el colon, además de promover un aumento en el movimiento intestinal y presentar efectos laxantes en pacientes con cuadros clínicos de estreñimiento crónico (González-Canga et al., 2004; Chua et al., 2010).

Su elevada capacidad de absorción de agua proporciona sensación de saciedad a través de la inducción de las señales cefálicas y de la fase gástrica; además, debido a su capacidad de aumentar la viscosidad del contenido gastrointestinal retrasa el vaciado gástrico, hace más lento el tránsito intestinal al constituir una barrera que protege a los nutrientes de la acción de las enzimas y que dificulta su acceso a la mucosa intestinal, prolongando así el efecto de plenitud, al tiempo que reduce la actividad hiperglucémica (González-Canga et al., 2004; Chua et al., 2010).

1.2.5. Fructanos de agave

Los fructanos son carbohidratos de reserva energética que se encuentran en algunas plantas o vegetales. Están compuestos de unidades repetidas de fructosa con una unidad de glucosa terminal o interna. Con base en su tipo de enlace pueden ser clasificados como inulinas, levanos, graminanos, inulinas neoserie y levanos neoserie; difieren en si son lineales o ramificados (enlaces β (2-1) y β (2-6)) (Vereyken et al., 2003).

Los fructanos de agave poseen una estructura de tipo mixta que les provee la característica de ser ramificados (Figura 1.12), éstos en medio acuoso desarrollan disoluciones de baja viscosidad, similar a los azúcares simples y adicionalmente

se ha demostrado que presentan propiedades de superficie las cuales son de utilidad al desarrollar sistemas dispersos alimenticios. El grado de polimerización fluctúa entre 6 y 70, y a los de tamaño pequeño (menores a 20 unidades) se les denomina fructooligosacáridos (Sosa-Herrera et al., 2016).

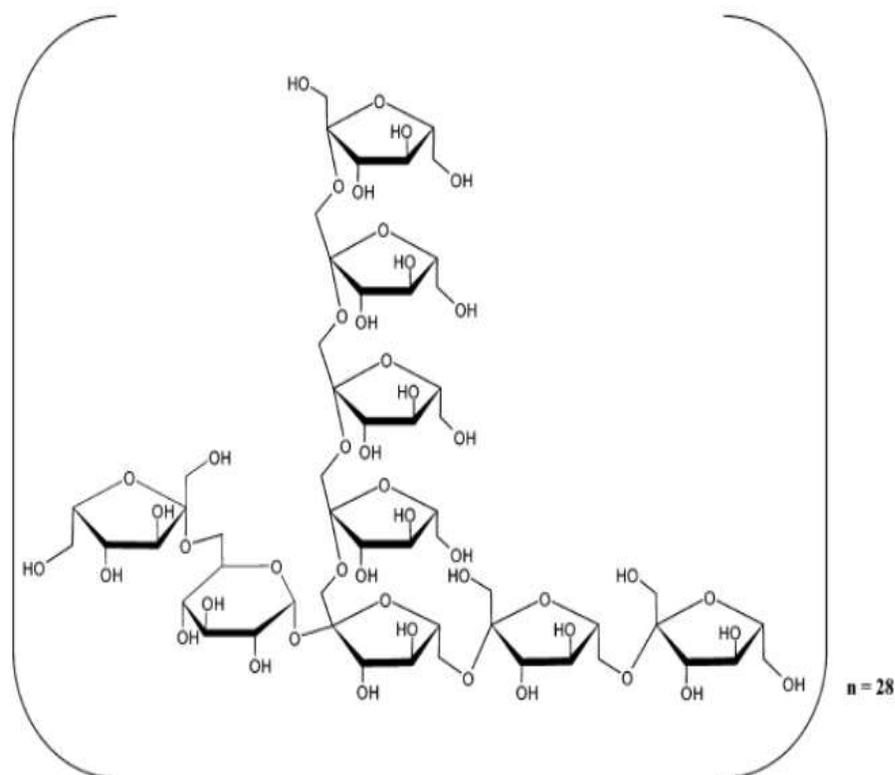


Figura 1.12. Propuesta de la estructura para fructanos de *A. tequilana Weber* variedad azul (López et al., 2003).

Se han reportado propiedades funcionales de los fructanos de agave relacionadas con la salud humana, como la estimulación del crecimiento de las bacterias probióticas, causadas por sus productos de fermentación, tales como los ácidos grasos de cadena corta, así los fructanos provocan cambios específicos en la composición y/o la actividad de la microbiota gastrointestinal por su resistencia al ambiente gástrico, al no ser digerible por las enzimas digestivas humanas debido a los enlaces β presentes en su estructura. Otras propiedades como el efecto inmunomodulador, la reducción de peso y el aumento de la secreción de péptidos

implicados en la regulación del apetito también fueron evidenciadas (Márquez-Aguirre et al., 2013; Ritsema y Smeekens, 2003; Koenen et al., 2016).

1.3. Estudios en espumas lácteas

Las propiedades espumantes de la leche son resultado de varios factores: la disponibilidad del tensoactivo que disminuye la tensión superficial, las propiedades reológicas de la interface debido a las interacciones presentes y la viscosidad de la fase líquida (Augustin y Clarke, 2008). Además, las propiedades de las espumas de leche descremada dependen de las condiciones y composición con la que se efectúa la formación de espuma.

1.3.1. Efecto de temperatura

Particularmente la temperatura de la leche tiene un fuerte efecto. Un estudio realizado por Kamath et al. (2008) demostró que el volumen de espuma formado a partir de leche descremada aumenta progresivamente con el aumento de la temperatura de la leche al espumar, empleándola a temperaturas de 5 a 65°C, mientras que el rendimiento de la espuma disminuye, así como el diámetro medio de las burbujas.

Dicho estudio evidenció además que la espumabilidad de las leches enteras disminuye al aumentar la temperatura hasta 25 °C, sin embargo, las leches enteras formaron espumas extremadamente inestables en el rango de temperatura de 5-35 °C. La estabilidad de la espuma formada a partir de leche entera homogeneizada cruda o pasteurizada aumentó al aumentar la temperatura en el rango de 35-85 °C.

1.3.2. Efecto del pH

El pH de la leche se encuentra muy cercano a la región neutra, tiene poco efecto sobre el rendimiento de las espumas de leche descremada y su resistencia al drenado (Huppertz, 2010), sin embargo, estudios previos han demostrado que cuando el pH se reduce a 5.5, se observa un aumento en la capacidad de espumado de la leche descremada (Augustin y Clarke, 2008). Este aumento en la capacidad espumante puede ser debido a la disociación de la β -caseína particularmente desde las micelas de caseína a este pH, lo que ayuda a la cobertura rápida y eficaz de la interfaz aire-agua. A un pH aún más bajo, 4.5-5.0, las propiedades espumantes de la leche descremada son muy pobres debido a la precipitación de caseínas a este pH (Zhang et al., 2004). El diámetro de la burbuja en estas espumas no se ve afectado por el pH de la leche en el rango neutro, de 6.4 a 7.0. Ajustar el pH de la leche a valores arriba de 7.0 no representa efecto en el rendimiento de la espuma, sin embargo, mejora la resistencia de la espuma al drenado (Augustin y Clarke, 2008). Esto puede estar relacionado con el incremento de la viscosidad por la desorganización de las micelas de caseína (Huppertz, 2010).

Otros estudios han mostrado que las proteínas solubilizadas que propician la formación de espumas son más estables en su punto isoeléctrico que en cualquier otro pH. En el pH isoeléctrico o cerca de éste, la reducida presencia de interacciones de repulsión promueven interacciones favorables proteína-proteína y la formación de una película viscosa en la interfase, favoreciendo tanto la capacidad de espumado como la estabilidad de la espuma. Cabe mencionar que si la proteína es poco soluble en su pl, como la mayoría de las proteínas en alimentos, entonces sólo la fracción soluble de la proteína se verá involucrada en la formación de la espuma, y aunque la cantidad de espuma formada sea baja la estabilidad será alta. Aunque la fracción insoluble no contribuya a la capacidad de espumado, la adsorción de las partículas de proteína insoluble ayudan a estabilizar parcialmente la espuma, probablemente por un aumento en las fuerzas de cohesión en la película de proteína (Badui, 2006).

1.3.3. Efecto de la composición química

A pesar de que las proteínas parecen ser esenciales en la obtención de las espumas lácteas, su concentración en la leche descremada (fluida) es tan abundante que, para la formación de espuma, ésta puede diluirse hasta cuatro veces, sin afectar el volumen ni estabilidad de la espuma obtenida, además, Borchering et al. (2009) reportaron que la dilución de leche tuvo poco efecto sobre el tamaño de las burbujas de aire y cambios en ellas durante el almacenamiento de las espumas.

Estudios realizados por Kamath et al. (2008) demuestran que tanto la capacidad espumante como la estabilidad de la espuma aumentaron con la disminución de la tensión superficial. El requerimiento de una máxima capacidad espumante y la estabilidad de la espuma, justifica la presencia de suficiente proteína, preferiblemente caseína. La incorporación de lípidos, aunque indeseable desde una perspectiva de formación de espuma, a menudo es necesaria por razones sensoriales.

La presencia de grasa en la leche influye fuertemente en sus propiedades espumantes. Incluso la presencia de pequeñas cantidades de grasa en la leche puede tener un efecto negativo tanto en la formación como en la estabilidad de las espumas lácteas, cuando el espumado se lleva a cabo a temperaturas en el intervalo de 10-40 °C, sin embargo, cuando los glóbulos de grasa llegan a ser lo suficientemente pequeños, la cantidad de grasa líquida puede llegar a ser insuficiente para provocar el adelgazamiento de la película líquida en una medida significativa como para inducir la ruptura de la burbuja (Huppertz, 2010).

En espumas a base de leche en polvo fortificada con concentrado de suero de leche, se observó que al aumentar la concentración de proteínas lácteas se ve reflejado un aumento de la viscosidad de la fase acuosa, lo cual favorece la capacidad espumante de las mezclas hasta alcanzar una meseta en dicho

comportamiento, obteniendo espumas más resistentes al drenado. Este comportamiento fue justificado por la capacidad de la fase líquida para atrapar el aire, que estuvo influenciada por la adsorción de proteína en la interfase aire-agua y por su capacidad para reducir la tensión superficial (Martínez- Padilla et al., 2014).

La adición de sacarosa, lactosa y soluciones azucaradas pueden perjudicar la capacidad espumante, pero mejorar la estabilidad de la espuma, pues incrementan la viscosidad del líquido que rodea a la proteína, reduciendo la velocidad de drenado del fluido de la lamela (Badui, 2006).

Las espumas adicionadas con concentrado de suero de leche presentaron un beneficio en sus propiedades espumantes al aumentar la proporción de concentrado presente, sin embargo, entre estos, una concentración más baja de xantana (0.05%) mostró una mejor capacidad de formación de espuma (Martínez- Padilla et al., 2015).

En estudios previos realizados por Dolores- Becerra (2017), los fructanos de agave, concentrado de suero de leche (15%) y xantana (0.1%) mostraron ser una mezcla apropiada de biopolímeros para la formación de espumas estables. En dichos sistemas, la viscosidad de la fase acuosa aumenta al incrementar la concentración de fructanos de agave (1 - 25%); lo cual se puede atribuir al fortalecimiento de la red de proteínas por la interacción de los fructanos de agave que cubren las micelas de caseína (Sosa- Herrera et al., 2016). Este incremento de viscosidad permitió la estabilización de las espumas formadas, al disminuir el movimiento de las burbujas de aire dispersas en el seno del líquido, reducir la velocidad de difusión del aire de éstas; así como también al homogenizar y disminuir el tamaño de dichas burbujas. La adición de fructanos de agave en los sistemas representó un aumento en la densidad de las espumas obtenidas con respecto a la concentración de éstos, disminuyendo además el rendimiento volumétrico de las espumas.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Objetivos

Objetivo general

Evaluar el efecto de la mezcla en polvo de proteínas lácteas, polisacáridos (xantana y glucomanano de konjac) y fructanos de agave en la formulación de una base líquida para malteada a través de la medición de sus propiedades físicas, espumantes y de estabilidad de la espuma obtenida, proponiendo una formulación optimizada.

Objetivos particulares

- Determinar el efecto de la concentración de proteínas lácteas, polisacáridos y fructanos de agave en el pH y los parámetros reológicos de la fase acuosa cuantificando su impacto en la estabilidad y rendimiento de la espuma obtenida.
- Determinar el efecto de la concentración de proteínas lácteas, polisacáridos y fructanos de agave en la capacidad espumante de la fase acuosa, la densidad y estabilidad de la espuma obtenida, esta última a través del método gravimétrico y transmisión-retrodispersión de luz, para la optimización de la formulación.
- Aplicar un diseño de superficie de respuesta, determinando la formulación óptima basada en una similitud de parámetros reológicos, rendimiento y estabilidad con un producto comercial.

2.2. Materiales

Para la preparación de la malteada se emplearon: Concentrado de suero lácteo [CSL] (*Hegart S.A. de C.V.*, México; 34.0% proteína, 4.0% humedad), Fructanos de Agave [FA] (*Mieles Campos Azules S. A. de C. V.*, México; Inulina orgánica de Maguey, 3.29% humedad), Xantana [GX] (*Keltrol*, Kelco, California; 6.48% Humedad), Glucomanano de konjac [GMK] (*AlfaDelta S. A. de C. V.*, México), Leche entera pasteurizada de vaca (*Alpura*, México; 3.03% proteína, pH 6.71) y Agua purificada (*Epura*, *Pepsico*, México; pH 4.6).

2.3. Diseño experimental

En el software Minitab, se realizó un diseño de experimentos de tres factores (CSL, FA y proporción GX: GMK), con tres niveles cada uno (5, 7.5 y 10% CSL y FA; proporción 25:75, 50:50 y 75:25 GX: GMK, manteniendo 0.2% como concentración constante de espesantes) en el método de superficie de respuesta, el cual puede resumirse en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Diseño experimental para superficie de respuesta.

No. Corrida	Concentrado de suero de leche (%m/m)	Fructanos de agave (%m/m)	Xantana (%m/m)	Glucomanano de konjac (%m/m)
1	5	5	0.1	0.1
2	10	5	0.1	0.1
3	5	10	0.1	0.1
4	10	10	0.1	0.1
5	5	7.5	0.05	0.15
6	10	7.5	0.05	0.15
7	5	7.5	0.15	0.05
8	10	7.5	0.15	0.05
9	7.5	5	0.05	0.15
10	7.5	10	0.05	0.15
11	7.5	5	0.15	0.05
12	7.5	10	0.15	0.05
13	7.5	7.5	0.1	0.1
14	7.5	7.5	0.1	0.1
15	7.5	7.5	0.1	0.1

Las condiciones de temperatura para preparación de las muestras fueron de $23 \pm 1^\circ\text{C}$ mantenidas en el laboratorio con aire acondicionado. Cada formulación, así como el producto comercial seleccionado para su comparación, "Slim Fast", se preparó por triplicado y en su posterior análisis, se calcularon promedios, desviación estándar y coeficiente de variación en porcentaje, para cada uno de los parámetros evaluados.

Se llevó a cabo el análisis de las propiedades de la fase líquida y de las espumas para la obtención de una superficie de respuesta y de las diferencias significativas a través de un análisis de varianza y el método de Tukey mediante el software Minitab 2017. Las hipótesis planteadas fueron, H_0 : Las medias de las variables son iguales, H_1 : Las medias de las variables son diferentes; con un nivel de significancia de 0.05%, es decir se acepta H_0 si el valor de P es igual o superior de 0.05.

2.4. Métodos

2.4.1. Preparación de la fase líquida

Se prepararon muestras de 400 g, en concentración 5, 7.5 y 10% de CSL y fructanos de agave y 0.2% de polisacáridos, variando en proporción estos últimos. Los polvos se hidrataron en leche entera a $23 \pm 1^\circ\text{C}$, con un agitador de propelas (*DLab*, OS20-S), con una propela de hélice marina; agregando uno a uno: glucomanano de konjac, 20 minutos a 750 rpm; xantana, 10 minutos a 750 rpm; CSL, 20 minutos a 870 rpm y fructanos de agave, 10 minutos a 870 rpm. Posteriormente, las muestras se homogenizaron (Homogenizador *Silverson*, LR4, Estados Unidos de América) dos minutos a 6295 rpm. Para su completa hidratación, permanecieron 22 horas en refrigeración a 6°C .

2.4.2. Preparación de la espuma

Una vez refrigeradas, las muestras se sometieron a batido en una batidora profesional (*Kitchen Aid*, Estados Unidos) con agitador de globo durante 5 minutos a 257 rpm. La preparación se llevó a cabo a una temperatura ambiente de 23 ± 1 °C mantenida con aire acondicionado.

2.4.3. Determinación de propiedades de la fase líquida

Tras la preparación la fase líquida, se procedió a la evaluación de sus propiedades, antes del espumado.

El valor de pH se determinó en un potenciómetro (*Oakton Instruments*, H700, Estados Unidos).

Las propiedades de flujo se evaluaron en un reómetro (*Anton Paar*, MCR301, Austria) con cono, 75 mm de diámetro y ángulo de 1° a 10°C. Se aplicó un precizamiento de la muestra durante 150 s a velocidad de cizalla de 500 s^{-1} , necesario para eliminar burbujas presentes y verificar dependencia con el tiempo de cizallamiento, a través del trazado de un gráfico de viscosidad en función del tiempo de cizallamiento, se registraron los valores de viscosidad a 10 y 150 s, y se calculó la diferencia. Posteriormente la velocidad de cizalla se disminuyó en un intervalo de $500-10 \text{ s}^{-1}$ dividido en 25 puntos, tomando una lectura cada 10 s. Se elaboraron las curvas de flujo, esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla y ajustándolas al modelo reológico que mejor describiera su comportamiento, se determinaron los parámetros reológicos correspondientes.

La capacidad espumante se determinó de forma inmediata a la preparación de la espuma, con una relación de volúmenes establecida en la Ecuación 1 (Martínez-Padilla et al., 2014).

$$\text{Capacidad espumante (\%)} = \left[\frac{\text{Volumen}_{\text{Espuma}} - \text{Volumen}_{\text{Líquido inicial}}}{\text{Volumen}_{\text{Líquido inicial}}} \right] 100 \quad (1)$$

2.4.4. Determinación de propiedades de la espuma

Para la determinación de la densidad de la espuma se llenaron al ras cajas Petri de 50 mm de diámetro, con agua purificada como material de referencia para determinar, a través de su masa, el volumen contenido, después se llenaron con la espuma recién elaborada, nivelando la superficie con una espátula y se midió su masa (Martínez- Padilla et al., 2014). El cálculo se realizó mediante una relación establecida en la Ecuación 2.

$$\rho_{\text{Espuma}} = \frac{\text{masa}_{\text{Espuma}}}{\text{Volumen}_{\text{Caja}}} \quad (2)$$

La estabilidad de la espuma se evaluó volumétricamente en copas de estabilidad graduadas, con una capa delgada de fibra de vidrio al fondo para evitar el flujo de espuma; las copas se llenaron con espuma fresca hasta la marca de 100 mL del vaso de precipitados y se midió el tiempo de drenado por cada 2 mL de líquido hasta los 10 mL de la probeta acoplada. Con los datos obtenidos se elaboraron gráficas de volumen de líquido drenado con respecto al tiempo, donde los resultados se ajustaron a un modelo de línea recta en el cual la pendiente representa la velocidad de drenado, esto para determinar su cinética.

Dicha estabilidad también se determinó por un análisis óptico de perfiles de transmisión-retrodispersión de luz con respecto al tiempo como respuesta a la aplicación de pulsos infrarrojos (850 nm) usando un *Turbiscan, MA200*, cuyos tubos fueron introducidos en la espuma fresca y llenados con ayuda de una propipeta hasta aproximadamente 60 mm de su altura para ser sellados por ambos extremos e introducidos al equipo para su escaneo; en cada muestra se realizaron 8 escaneos con intervalos de 5 minutos. Como se muestra en la Figura 2.1, el aumento de diámetro de burbuja por maduración de Ostwald se observa

como una disminución progresiva en el perfil de retrodispersión en el centro del tubo de vidrio (Martínez- Padilla et al., 2014). Una vez identificada la zona de interés, se procedió a la determinación de las cinéticas con ayuda del software Excel, ajustando las curvas al modelo correspondiente para obtener los valores de sus parámetros.

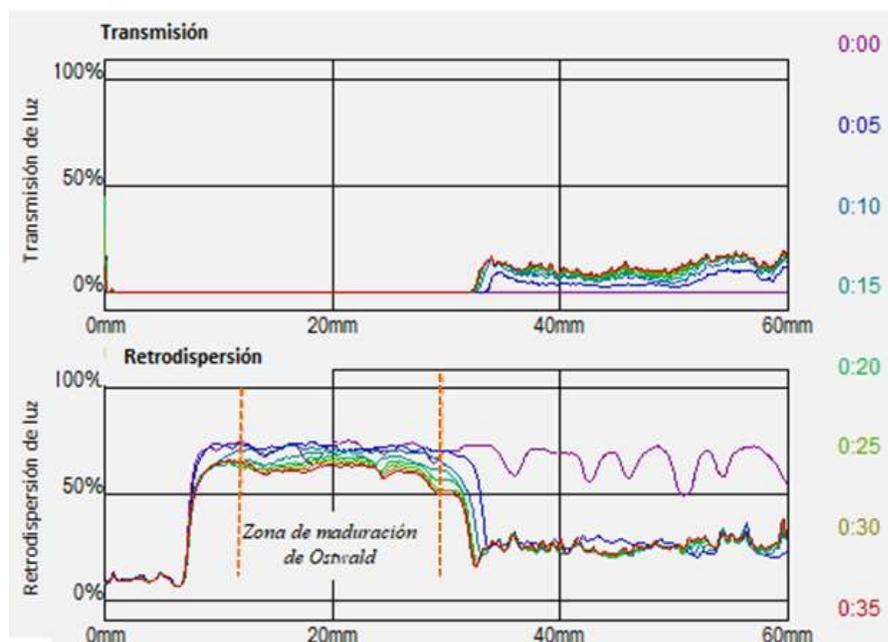


Figura 2.1. Perfiles identificados de transmisión y retrodispersión de luz en espuma.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1. Propiedades de la fase líquida

3.1.1. pH

En el Cuadro 3.1 se muestra que el pH de la fase líquida se encontró, para todos los casos, por debajo del valor neutro, en un intervalo de 6.44 a 6.61, incluso alejado del punto isoeléctrico de la β -lactoglobulina ($pI=5.2$), principal seroproteína, por lo que puede asumirse que ésta mantuvo su funcionalidad y solubilidad dentro del sistema.

Cuadro 3.1. pH de la fase líquida elaborada a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones, y del producto comercial de referencia, evaluadas a $19\pm 1^\circ\text{C}$.

Concentración estudiada	pH promedio	Desviación estándar	C.V. (%)
CSL 5%- FA 5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	6.61 ^a	0.014	0.22
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	6.56 ^{a,b,c}	0.031	0.47
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	6.58 ^{a,b}	0.085	1.29
CSL 5%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	6.53 ^{a,b,c,d}	0.009	0.14
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	6.54 ^{a,b,c,d}	0.033	0.51
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	6.49 ^{a,b,c,d}	0.002	0.02
CSL 7.5%- FA 7.5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	6.49 ^{b,c,d}	0.019	0.29
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.05%- GMK 0.15%	6.48 ^{b,c,d}	0.024	0.38
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.15%- GMK 0.05%	6.48 ^{b,c,d}	0.003	0.05
CSL 10%- FA 5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	6.44 ^d	0.012	0.18
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	6.47 ^{c,d}	0.033	0.52
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	6.55 ^{a,b,c,d}	0.038	0.58
CSL 10%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	6.45 ^{c,d}	0.021	0.33
Producto comercial "Slim Fast"	6.44	0.004	0.06

Distintos superíndices indican diferencias significativas entre medias aritméticas.

Los valores de pH se analizaron con el método de Tukey (Anexo 1, Cuadro 4.1 y 4.2), se evidenció la existencia de diferencias significativas únicamente en las

muestras con superíndice a y d, las cuales corresponden a los extremos del intervalo de pH reportado para las muestras con variación de concentración de CSL, FA, GX y GMK.

Asimismo, tomando en cuenta el valor absoluto de los efectos de cada componente, obtenido a través del análisis de superficie de respuesta (Anexo 1, Cuadro 4.3), como se muestra en la Figura 3.1, la concentración de CSL es la única que afectó significativamente, ya que su barra representativa sobrepasa la línea punteada de referencia, que señala el nivel de significancia del modelo y el valor de P es inferior a 0.05%, por lo que se rechaza H_0 , lo que implica una tendencia lineal hacia la disminución de éste, al aumentar la concentración de CSL, tendencia similar a la reportada por Martínez-Padilla et al. (2014), en leche descremada en polvo 10% en mezcla con CSL, donde el pH disminuyó de 6.52 con 5% de CSL a 6.32 al incrementar a un 15% la concentración de éste.

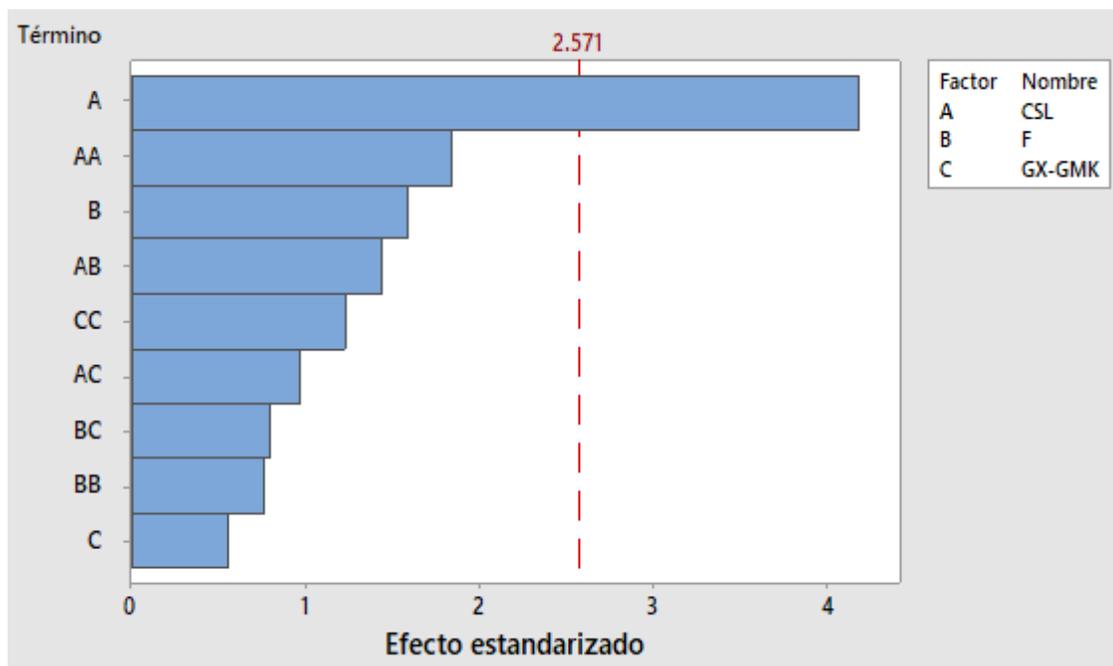


Figura 3.1. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de pH en base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones.

3.1.2. Propiedades de flujo

A la fase líquida elaborada para la obtención de la malteada se le aplicó un precizamiento a velocidad de cizalla constante de 500 s^{-1} . Se observaron dos comportamientos, tixotropía y comportamiento independiente del tiempo de cizallamiento, en el primero la viscosidad disminuyó en función del tiempo de aplicación, mientras que en otras la viscosidad fue prácticamente constante (Figura 3.2). La viscosidad al inicio del precizamiento toma importancia para conocer las propiedades reológicas del producto en reposo y tras el precizamiento determinar su tixotropía. La máxima viscosidad registrada al inicio de la prueba fue cercana $75.3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, y la mínima registrada $10.2 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

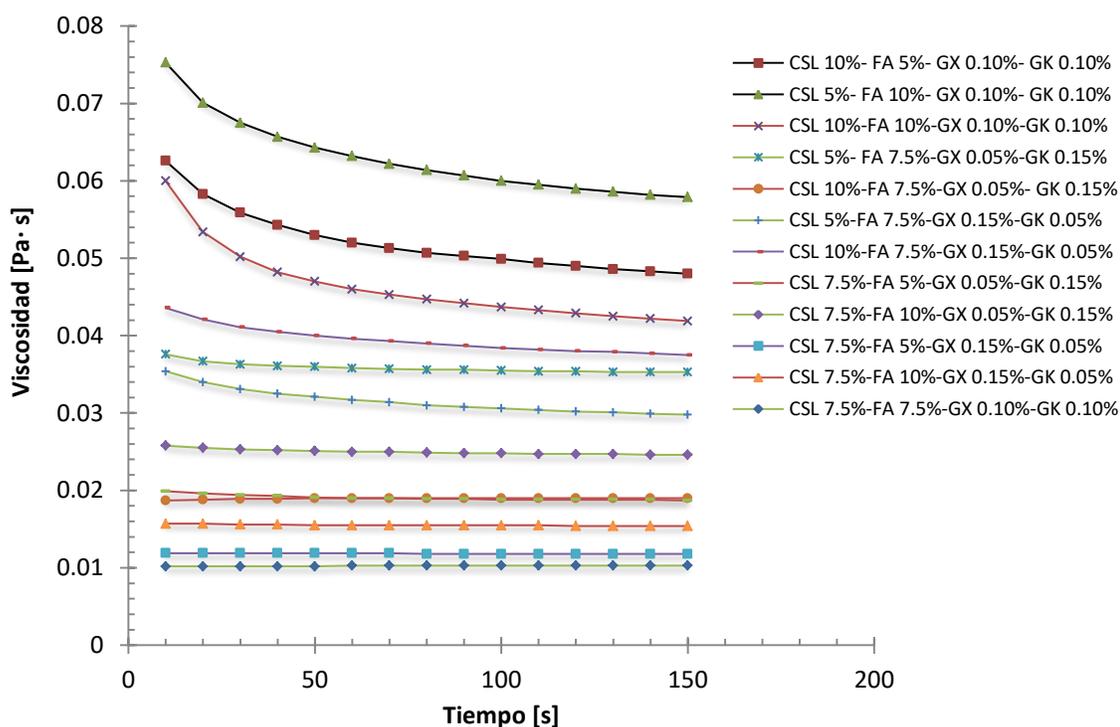


Figura 3.2. Viscosidad en función del tiempo durante el precizamiento de base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones.

En el Cuadro 3.2 se resumen los valores promedio de viscosidad al inicio y al final del precizamiento, así como la diferencia entre ellas para todas las formulaciones estudiadas y las del producto comercial tomando como referencia

en la optimización, para definir la dependencia con respecto al tiempo de cizallamiento.

Cuadro 3.2. Viscosidad evaluada durante el precizamiento de la fase líquida elaborada a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones y del producto comercial de referencia.

Concentración estudiada	$\eta_{@10s}$ (Pa·s)	$\eta_{@150s}$ (Pa·s)	Diferencia	Dependencia con el tiempo de cizallamiento
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.0368 ^d (± 0.002)	0.0345 ^c (± 0.001)	0.0022	Independiente
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.0343 ^d (± 0.003)	0.0213 ^{d,e} (± 0.007)	0.0131	Dependiente
CSL 5%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.0794 ^a (± 0.004)	0.0620 ^a (± 0.004)	0.0174	Dependiente
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.0212 ^{e,f} (± 0.002)	0.0203 ^{d,e} (± 0.002)	0.0008	Independiente
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.0118 ^{g,h} (± 0.000)	0.0116 ^{f,g} (± 0.000)	0.0003	Independiente
CSL 7.5%- FA 7.5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.0104 ^h (± 0.000)	0.0104 ^g (± 0.000)	0.0000	Independiente
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.0235 ^e (± 0.004)	0.0257 ^d (± 0.002)	-0.0022	Independiente
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.0154 ^{f,g,h} (± 0.000)	0.0151 ^{e,f,g} (± 0.000)	0.0003	Independiente
CSL 10%- FA 5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.0645 ^b (± 0.004)	0.0491 ^b (± 0.003)	0.0154	Dependiente
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.0184 ^{e,f,g} (± 0.000)	0.0187 ^{d,e,f} (± 0.000)	-0.0003	Independiente
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.0437 ^c (± 0.000)	0.0373 ^c (± 0.000)	0.0064	Dependiente
CSL 10%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.0591 ^b (± 0.000)	0.0416 ^{b,c} (± 0.000)	0.0175	Dependiente
Producto comercial "Slim Fast"	0.0620	0.0462	0.0158	Dependiente

La desviación estándar se indica entre paréntesis. Distintos superíndices indican diferencias significativas entre medias aritméticas.

Obsérvese que el cambio en la concentración de CSL representó un mayor impacto sobre la viscosidad de las muestras en comparación con la concentración de los FA. Existen diferencias significativas entre las muestras, siendo evidentes en aquellas que presentan la más baja y la más alta viscosidad, evaluada a 10 y 150 s de cizallamiento.

Las formulaciones con 7.5% de CSL, incluso con la mayor concentración de xantana, presentaron menor viscosidad y, a su vez, independencia de la viscosidad con respecto al tiempo de cizallamiento. Lo mismo ocurrió con los sistemas acuosos que contenían 7.5% de FA y la mínima concentración de xantana. Contrario a lo observado en muestras con nivel máximo y mínimo de CSL (10 y 5%, respectivamente), con cualquier nivel de polisacáridos, los cuales tienen un comportamiento tixotrópico.

Con los datos de la viscosidad al inicio del precizallamiento (evaluada en el primer punto, 10 s), se aplicó el diseño estadístico de superficie de respuesta, de acuerdo al valor de P, la viscosidad al inicio del precizallamiento fue afectada significativamente de forma cuadrática por los tres factores, principalmente por la concentración de CSL (P=0.001), sin existencia de alguna interacción estadística entre éstos. La ecuación para obtener un valor de viscosidad óptima al inicio del precizallamiento es:

$$\begin{aligned} \text{Viscosidad} &= 0.4503 - 0.0846 \text{ CSL} - 0.0403 \text{ FA} + 0.1156 \text{ GX-GMK} \\ \text{a 10 s} &+ 0.005667 \text{ CSL*CSL} + 0.003215 \text{ FA*FA} - 0.2003 \text{ GX-GMK*GX-GMK} - \\ &0.000966 \text{ CSL*FA} + 0.01112 \text{ CSL*GX-GMK} + 0.00052 \text{ FA*GX-GMK} \end{aligned}$$

El producto comercial también presentó dependencia con el tiempo de cizallamiento (Cuadro 3.2). Para determinar las propiedades de flujo, o dependencia con la velocidad de cizalla, enseguida del precizallamiento, se disminuyó la velocidad de cizalla hasta el reposo.

Las curvas de flujo obtenidas para los sistemas de estudio se presentan en la Figura 3.3 y las curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla, respectivas, en la Figura 3.4.

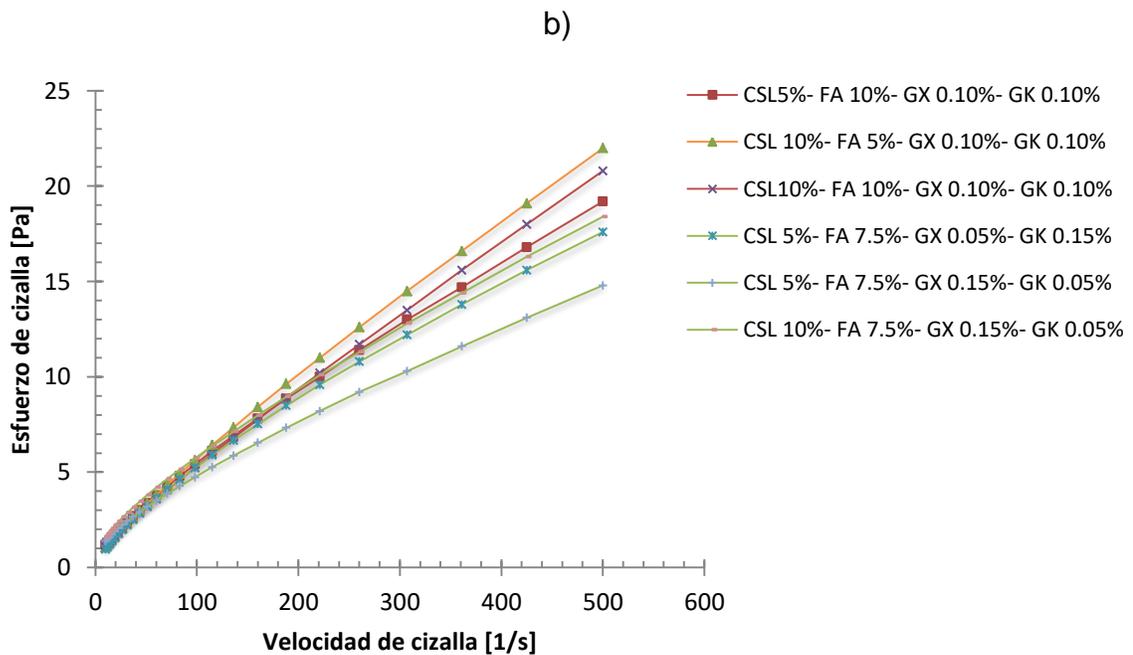
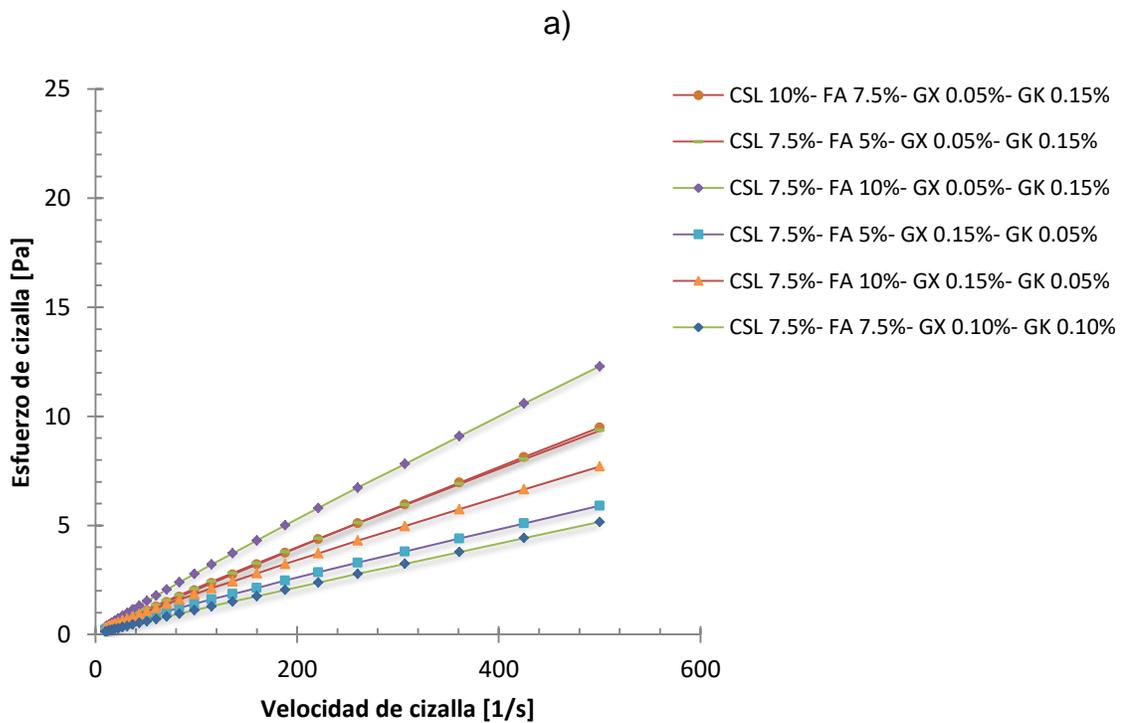


Figura 3.3. Curvas de flujo de base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones. a) Muestras de baja viscosidad y b) Muestras de alta viscosidad.

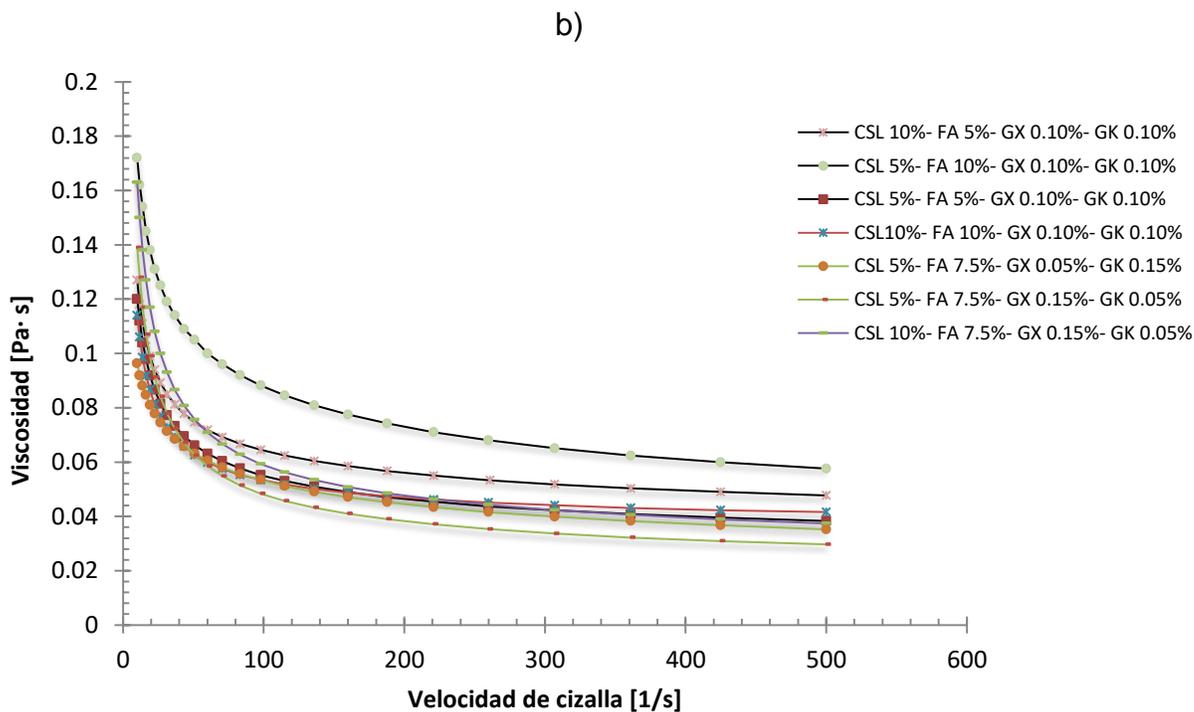
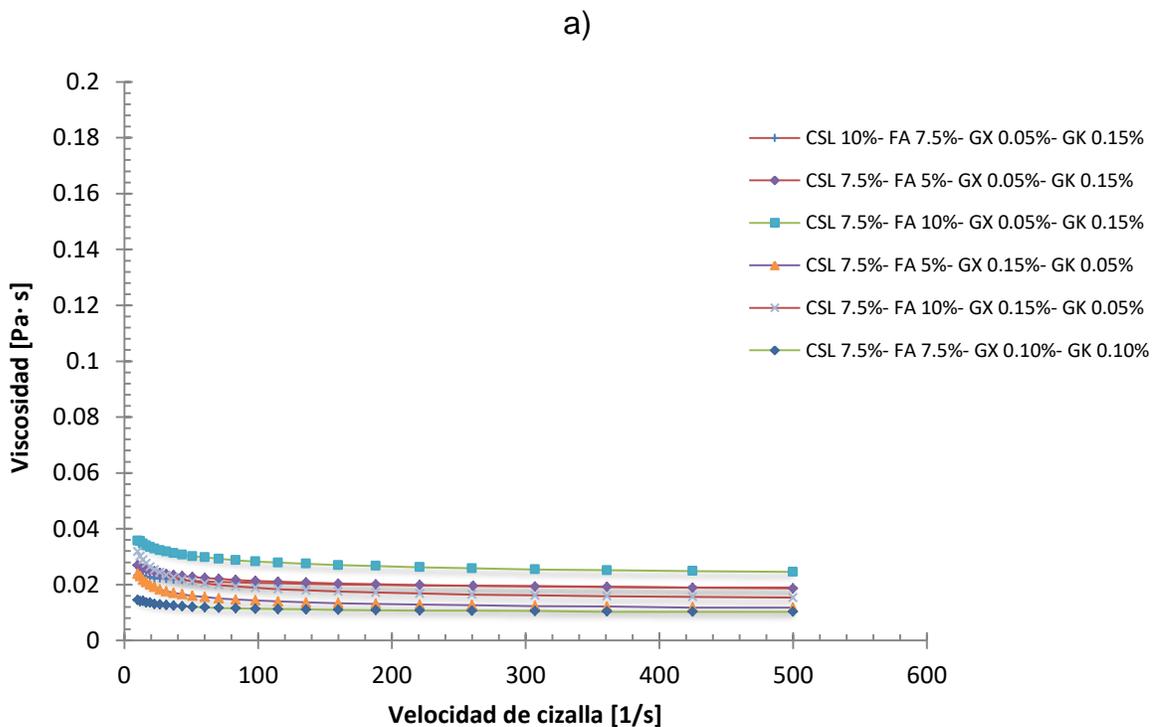


Figura 3.4. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones. a) Muestras de baja viscosidad y b) Muestras de alta viscosidad.

Se observó un comportamiento no newtoniano del tipo fluidificante a la cizalla, donde en las curvas de flujo disminuye el esfuerzo de cizalla progresivamente con respecto a la disminución de la velocidad de cizalla, proporcionando una curva característica de un modelo Herschel-Bulkley ($\sigma = \sigma_0 + k\dot{\gamma}^n$), que se distingue por mostrar un comportamiento tipo potencia, al sobrepasar un cierto esfuerzo de cedencia, después del cual comienza a fluir, lo que implica una destrucción de su estructura (Figura 3.3).

En las curvas de viscosidad, se observa poca dependencia de la velocidad de cizalla en las muestras con 7.5% de CSL, incluso con la mayor concentración de xantana, de igual manera como se observó durante el precizallamiento (Figura 3.4). Los parámetros obtenidos tras el ajuste de los datos al modelo correspondiente se muestran en el Cuadro 3.3.

Cabe aclarar que, en comparación con las viscosidades en el precizallamiento (Cuadro 3.2), los datos de esfuerzo de cedencia e índice de consistencia presentan desviaciones estándar mayores, debido principalmente a que éstos últimos son obtenidos mediante el ajuste de la curva respectiva, método propenso a generar un mayor error, mientras que la viscosidad se trata de un valor puntual.

En cuanto al esfuerzo de cedencia obtenido por extrapolación de la curva de flujo y ajuste de datos al modelo reológico, de igual manera que en los datos de viscosidad obtenidos durante el precizallamiento, las muestras con 7.5% de CSL presentaron los menores valores, éstos se encuentran en un intervalo de 0.03 y 0.19 Pa. El resto de las muestras alcanzaron valores de hasta 0.58 Pa.

Cuadro 3.3. Parámetros del modelo Herschel-Bulkley para producto comercial y fase líquida a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones.

Concentración estudiada	σ_0 (Pa)	k (Pa·s ⁿ)	n
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.05	0.160	0.64
	(± 0.000)	(± 0.025)	(± 0.162)
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.58	0.137	0.74
	(± 0.062)	(± 0.012)	(± 0.006)
CSL 5%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.40	0.106	0.69
	(± 0.000)	(± 0.050)	(± 0.083)
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.03	0.030	0.92
	(± 0.011)	(± 0.003)	(± 0.014)
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.06	0.031	0.86
	(± 0.008)	(± 0.012)	(± 0.038)
CSL 7.5%- FA 7.5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.07	0.017	0.93
	(± 0.082)	(± 0.006)	(± 0.053)
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.04	0.065	0.90
	(± 0.012)	(± 0.041)	(± 0.048)
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.19	0.032	0.90
	(± 0.103)	(± 0.005)	(± 0.003)
CSL 10%- FA 5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.27	0.259	0.75
	(± 0.094)	(± 0.108)	(± 0.034)
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.05	0.025	0.97
	(± 0.005)	(± 0.007)	(± 0.020)
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.55	0.144	0.81
	(± 0.212)	(± 0.054)	(± 0.061)
CSL 10%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.58	0.104	0.88
	(± 0.088)	(± 0.034)	(± 0.021)
Producto comercial "Slim Fast"	0.5	0.215	0.74
	(± 0.000)	(± 0.006)	(± 0.003)

La desviación estándar se indica entre paréntesis.

Se determinó a través del análisis de varianza por superficie de respuesta (Anexo 1, Cuadro 4.5) que la proporción de polisacáridos en el sistema fue un factor significativo para el esfuerzo de cedencia ($P=0.047$), presentándose además un efecto estadísticamente significativo, de tipo cuadrático, de la concentración de CSL (Figura 3.5), causante de un comportamiento no lineal, el cual puede visualizarse más claramente mediante una gráfica de contorno (Figura 3.6), representada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_0 = 3.91 - 0.851 \text{ CSL} - 0.314 \text{ F} + 1.34 \text{ GX-GMK} + 0.0481 \text{ CSL*CSL} + 0.0117 \text{ F*F} - 1.01 \text{ GX-GMK*GX-GMK} + 0.0174 \text{ CSL*F} - 0.012 \text{ CSL*GX-GMK} + 0.048 \text{ F*GX-GMK}$$

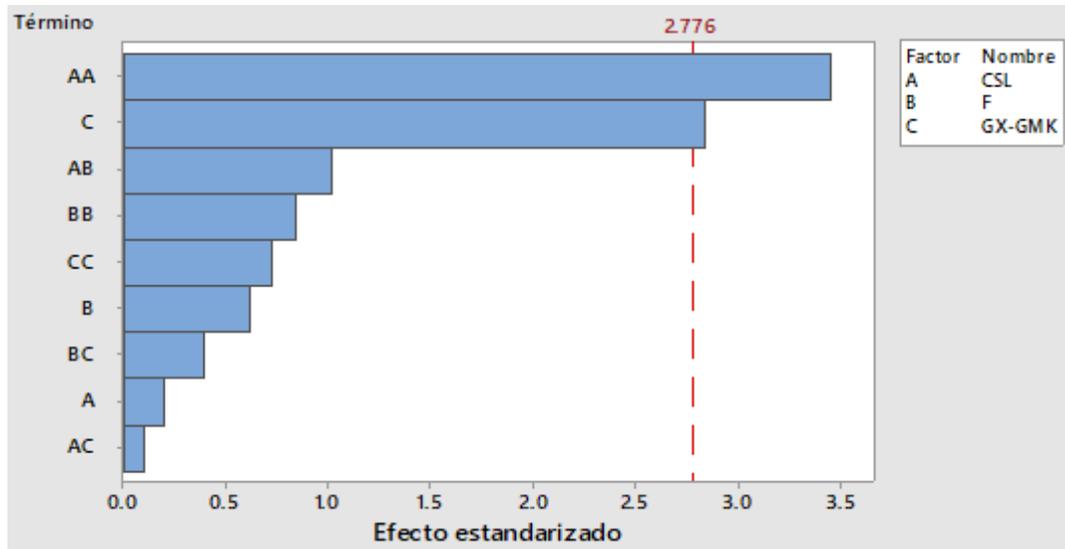


Figura 3.5. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de esfuerzo de cedencia en base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones.

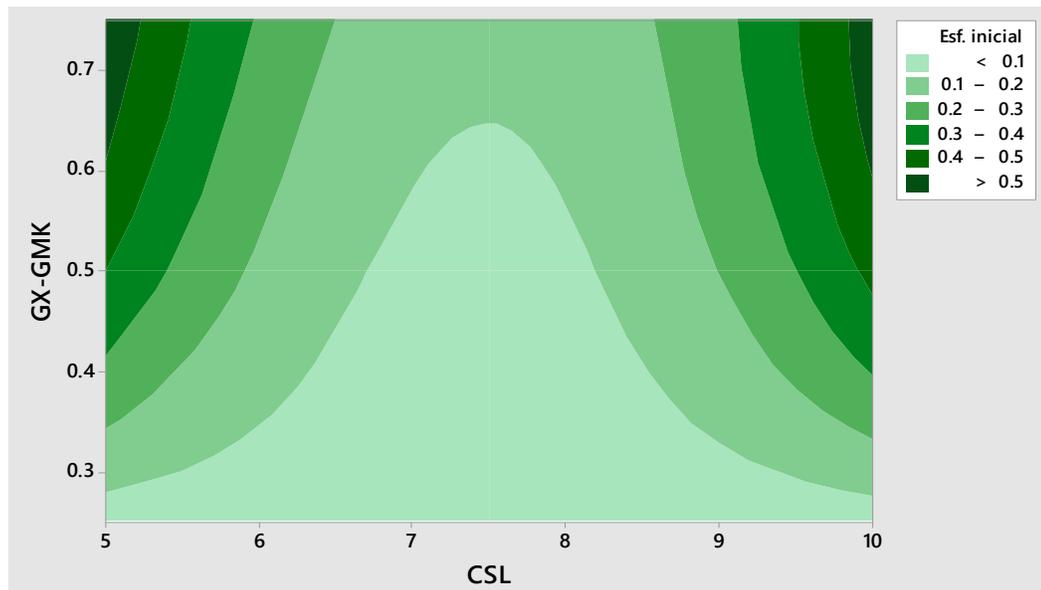


Figura 3.6. Gráfica de contorno de esfuerzo de cedencia de los sistemas con respecto a su concentración de concentrado de suero de leche (CSL) y proporción de polisacáridos (GX-GMK).

Tomando como valor objetivo el esfuerzo de cedencia del producto comercial evaluado (Cuadro 3.3), dentro de la gráfica de contorno (Figura 3.6), el punto óptimo podría encontrarse en muestras con mayor proporción de GX, ya sea con 5 o 10% de CSL, regiones en las cuales se observa una coloración más oscura, correspondiente a valores cercanos a 0.5 Pa.

Los sistemas con altas concentraciones de CSL en combinación con mayor proporción de GX, en su mayoría, tienen los valores más elevados de índice de consistencia (0.144 - 0.259 Pa.sⁿ), lo anterior puede asumirse como resultado de una incompatibilidad termodinámica, produciendo un efecto sinérgico entre ambas macromoléculas; la xantana interactúa en solución a través de contactos estéricos que forman una red débil dinámica, fortalecida con la presencia de proteínas de suero de leche que se dispersan en la disolución de xantana. Estos efectos son directamente responsables del aumento en los parámetros reológicos, de acuerdo con lo descrito por Sanchez et al. (1997).

Las formulaciones con 7.5% de CSL presentaron los menores valores (0.017 - 0.065 Pa.sⁿ), debido a la existencia de un efecto significativo de tipo cuadrático del CSL (P=0.042), como lo muestra la barra de efectos estandarizados (Figura 3.7), causante de un comportamiento estadístico de tipo parabólico, observable en la curvatura del gráfico de superficie (Figura 3.8), con un mínimo en la concentración intermedia de CSL y los máximos ubicados en los extremos de ésta.

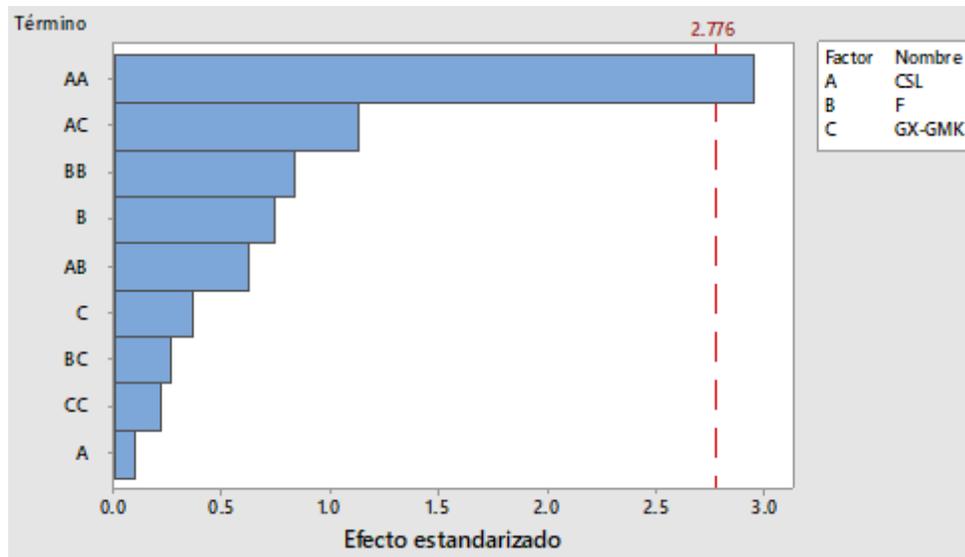


Figura 3.7. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de índice de consistencia en base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones.

Mediante este análisis por superficie de respuesta (Anexo 1, Cuadro 4.6) se genera la ecuación para la obtención de un valor óptimo de índice de consistencia:

$$k = 1.191 - 0.254 \text{ CSL} - 0.041 \text{ F} - 0.166 \text{ GX-GMK} + 0.01718 \text{ CSL} \cdot \text{CSL} + 0.00486 \text{ F} \cdot \text{F} - 0.126 \text{ GX-GMK} \cdot \text{GX-GMK} - 0.00444 \text{ CSL} \cdot \text{F} + 0.0568 \text{ CSL} \cdot \text{GX-GMK} - 0.0136 \text{ F} \cdot \text{GX-GMK}$$

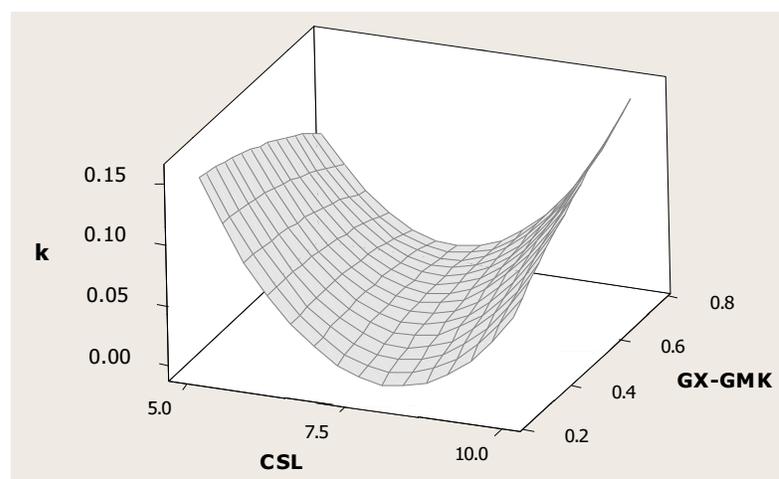


Figura 3.8. Gráfico de superficie de índice de consistencia de los sistemas con respecto a su concentración de concentrado de suero de leche (CSL) y proporción de polisacáridos (GX-GMK).

El índice de comportamiento al flujo de los sistemas menos viscosos (7.5% CSL) fue cercano a la unidad (0.86 - 0.93), confirmando la menor dependencia con la velocidad de cizalla observada en las curvas de flujo (Figura 3.3). Cuanto mayor sea la cercanía del valor de dicho parámetro a la unidad, el comportamiento del fluido es más parecido al de un fluido newtoniano. De igual manera, los sistemas más viscosos fueron más dependientes de la velocidad de cizalla (0.64-0.81).

La Figura 3.9 muestra los efectos estandarizados respecto al nivel de significancia del modelo de superficie de respuesta, evidenciando que la concentración de CSL afectó significativamente el valor de índice de comportamiento al flujo, tanto de forma lineal ($P=0.005$) como cuadrática ($P=0.002$), además existe una interacción de ésta con la proporción de polisacárido ($P=0.020$), mientras que la concentración de FA no mostró efecto significativo sobre dicho parámetro (Anexo 1, Cuadro 4.7).

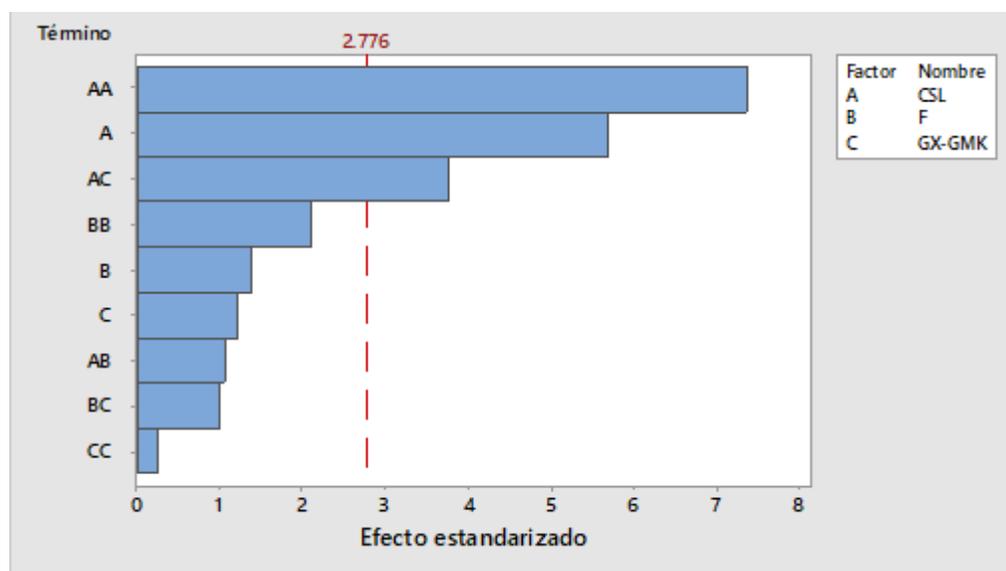


Figura 3.9. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de índice de consistencia en base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones.

En el gráfico de superficie (Figura 3.10) se observa la tendencia del valor de índice de consistencia hacia una curvatura con respecto a la concentración de CSL, mostrando además interacción estadística con la proporción de polisacáridos en el sistema, tal como se mencionó anteriormente.

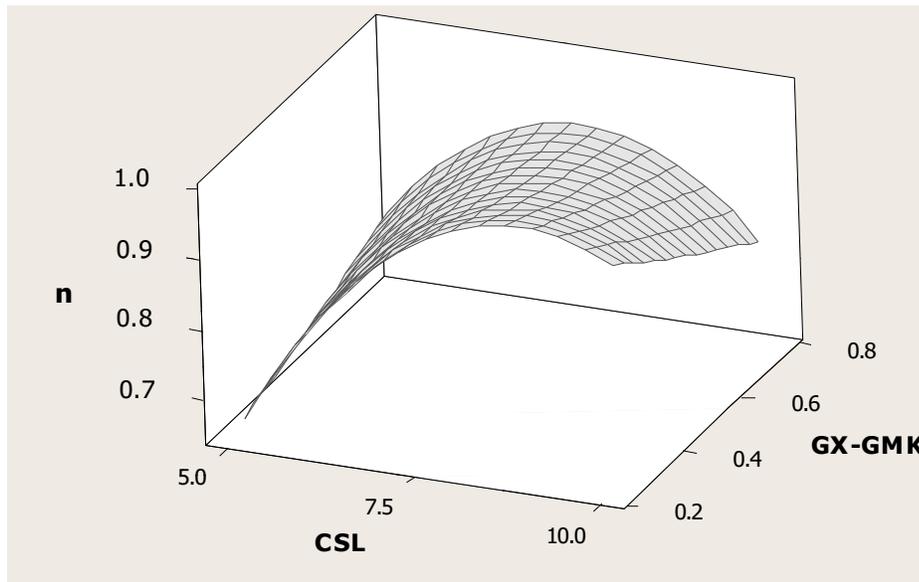


Figura 3.10. Gráfico de superficie de índice de comportamiento al flujo de los sistemas con respecto a su concentración de concentrado de suero de leche (CSL) y proporción de polisacáridos (GX-GMK).

3.1.3. Capacidad espumante

Se evaluó la capacidad espumante de la malteada, los valores más elevados se obtuvieron en sistemas con glucomanano de konjac en mayor proporción (Figura 3.11), en la muestra elaborada con CSL 7.5%, FA 10%, GX 0.05% y GMK 0.15% se obtuvo la mayor capacidad espumante; lo anterior puede sustentarse a través del análisis estadístico, presentado en el Anexo 1 (Cuadro 4.8 y 4.9), el cual determina que únicamente la proporción de polisacáridos tiene un efecto significativo ($P= 0.019$) sobre dicha propiedad.

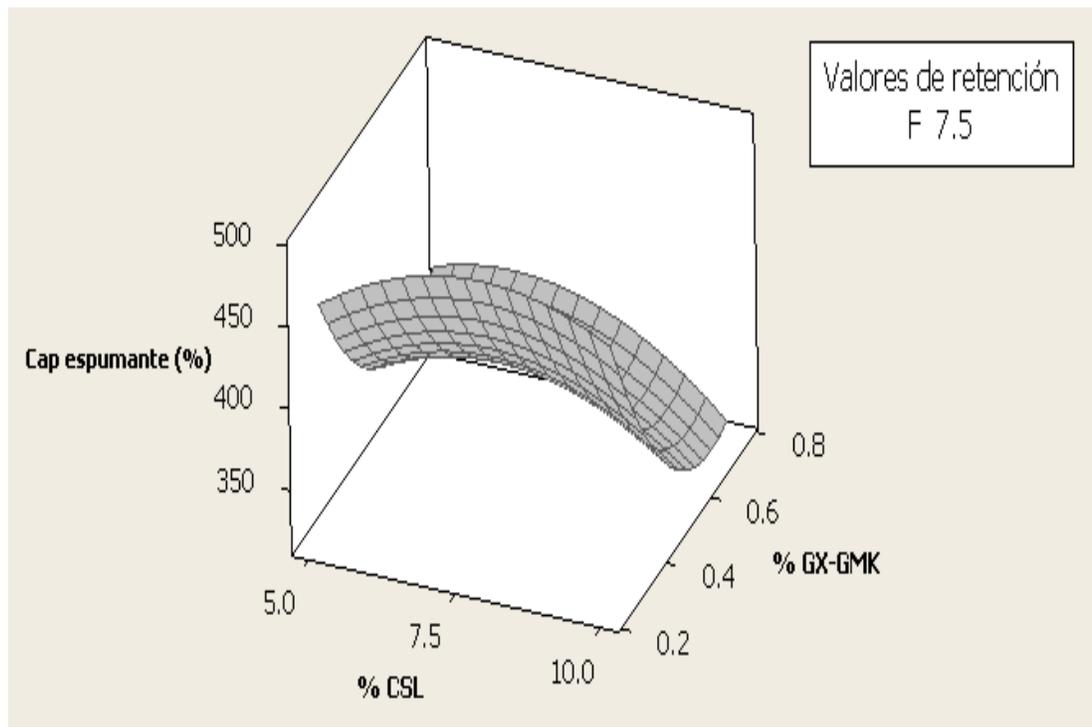


Figura 3.11. Gráfico de superficie de capacidad espumante de los sistemas con respecto a su concentración de concentrado de suero de leche (CSL) y proporción de polisacáridos (GX-GMK).

Tomando en cuenta el análisis de las propiedades reológicas de la fase líquida, se puede observar que el incremento de viscosidad se relaciona inversamente con la capacidad espumante, esto debido a la reducción de su capacidad de incorporación de aire (Martínez- Padilla et al., 2015).

En muestras con elevada concentración tanto de FA como de CSL, se evidencia que el alto contenido de sólidos afecta a la capacidad espumante (Figura 3.12) debido a la sobresaturación de la interfase, lo que puede propiciar la formación de micelas de proteína (Aranberri et al., 2006).

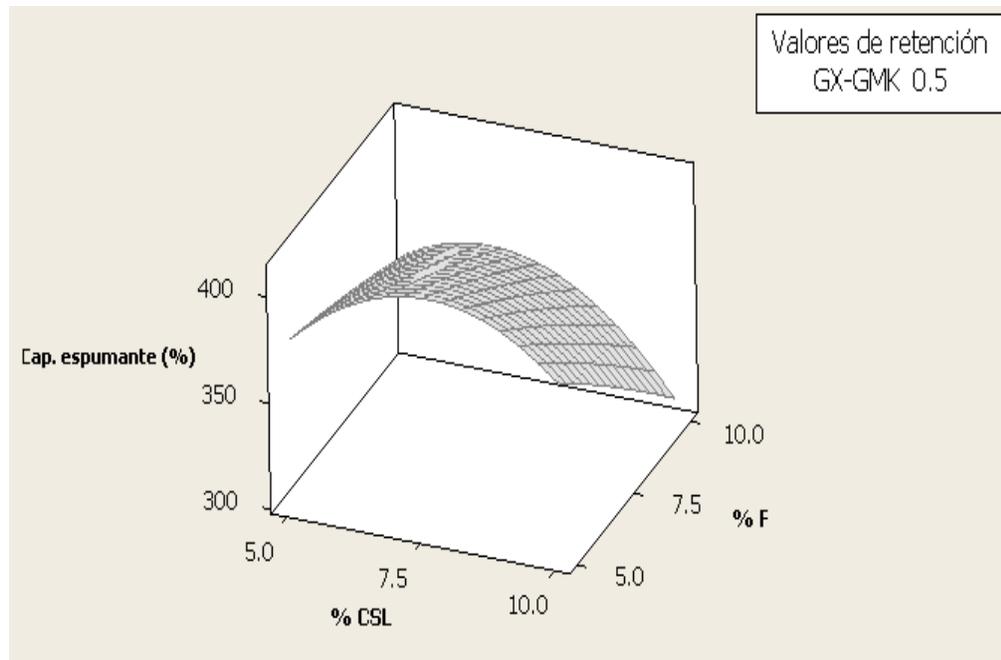


Figura 3.12. Gráfico de superficie de capacidad espumante de los sistemas con respecto a su concentración de concentrado de suero de leche (CSL) y fructanos de agave (FA).

La capacidad espumante de la fase líquida para atrapar aire está influenciada por la adsorción de proteínas en la interfaz de ésta y su capacidad para reducir la tensión superficial. Los valores se encontraron entre 275 y 540%, mostrando, a través de la prueba de Tukey, diferencias significativas únicamente entre los extremos de este intervalo, así, para todas las formulaciones evaluadas (Cuadro 3.4), el rendimiento fue menor al obtenido para espumas de CSL-GX determinado por Martínez-Padilla et al. (2015), cuyos valores llegaban al 600% para espumas CSL 10% con GX 0.05% y 550% para espumas CSL 10% con GX 0.15%, esta discrepancia es debida a que se trata de productos con diferentes características deseadas, de modo que se debe considerar que para la elaboración de una malteada no se requiere la total incorporación de aire a la muestra.

Cuadro 3.4. Capacidad espumante de fase líquida preparada a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones y del producto comercial de referencia.

Concentración estudiada	Capacidad Espumante (%)
CSL 5%- FA 5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	397.8 ^{c,d} (± 3.1)
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	403.4 ^{c,d} (± 18.7)
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	386.1 ^{c,d} (± 24.3)
CSL 5%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	372.2 ^{d,e} (± 7.9)
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	500.0 ^{a,b} (± 0.0)
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	422.2 ^{b,c,d} (± 15.7)
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.05%- GMK 0.15%	540.0 ^a (± 0.0)
CSL 7.5%- FA 7.5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	385.3 ^{c,d} (± 20.8)
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.15%- GMK 0.05%	275.0 ^f (± 8.3)
CSL 10%- FA 5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	360.0 ^{d,e,f} (± 43.2)
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	461.1 ^{a,b,c} (± 28.3)
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	375.0 ^{c,d} (± 9.6)
CSL 10%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	287.2 ^{e,f} (± 54.3)
Producto comercial "Slim Fast"	294.4 (± 7.9)

La desviación estándar se indica entre paréntesis. Distintos superíndices indican diferencias significativas entre medias aritméticas.

3.2. Propiedades de la espuma

3.2.1. Densidad

La densidad de las espumas obtenidas, tanto de las formulaciones como del producto comercial tomado como referencia, se presentan de manera resumida en el Cuadro 3.5.

La densidad de las espumas se encontró entre un intervalo de 0.220 y 0.344 g/cm³, con valores de $P > 0.05$, es decir, sin efecto significativo de alguno de los factores evaluados, al realizar el análisis por superficie de respuesta (Anexo 1, Cuadro 4.13). La Figura 3.13 confirma lo anterior, mostrando que ninguna barra de efectos estandarizados sobrepasa la línea punteada que señala el nivel de significancia del modelo.

Cuadro 3.5. Densidad de las espumas obtenidas a partir de muestras preparadas a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones y del producto comercial de referencia.

Concentración estudiada	Densidad de espuma (g/cm ³)
CSL 5%- FA 5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.245 ^{c,d} (± 0.013)
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.258 ^{a,b,c,d} (± 0.004)
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.254 ^{b,c,d} (± 0.013)
CSL 5%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.289 ^{a,b,c,d} (± 0.010)
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.221 ^d (± 0.004)
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.234 ^d (± 0.005)
CSL 7.5%- FA 7.5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.249 ^{c,d} (± 0.011)
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.224 ^d (± 0.006)
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.344 ^a (± 0.003)
CSL 10%- FA 5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.340 ^{a,b} (± 0.014)
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.259 ^{a,b,c,d} (± 0.043)
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.268 ^{a,b,c,d} (± 0.012)
CSL 10%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.327 ^{a,b,c} (± 0.068)
Producto comercial "Slim Fast"	0.359 (± 0.047)

La desviación estándar se indica entre paréntesis. Distintos superíndices indican diferencias significativas entre medias aritméticas.

Los valores obtenidos para todas las muestras, se encontraron por arriba de los reportados por Martínez-Padilla et al. (2015) en espumas a base de CSL y xantana, sin embargo, se debe considerar que el objetivo de dicho estudio es evaluar las propiedades espumantes de las disoluciones, mas no la obtención como tal de un producto, así, la preparación de malteada requiere presencia de fase líquida en el producto final, es decir, no llegar a la incorporación total de aire a la muestra y por lo tanto involucra menor tiempo de batido en comparación con dicho estudio, en el que la fase líquida se sometió a batido durante 20 minutos. Dichas diferencias de condiciones resultan en obtención de características distintas.

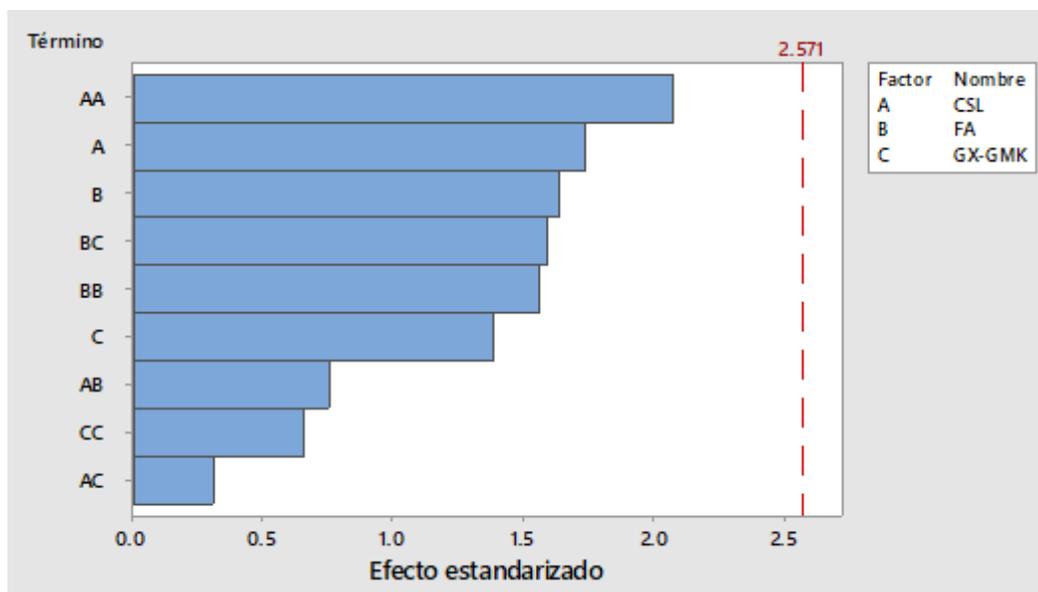


Figura 3.13. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para densidad de espumas obtenidas a partir de base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones.

3.2.2. Estabilidad por drenado gravimétrico

Debido a que la estabilidad de las espumas obtenidas se evaluó mediante la medición del tiempo necesario para alcanzar cada 2 mL de líquido drenado hasta llegar a los 10 mL, con la finalidad de comparar los tiempos de drenado, se presenta en el Cuadro 3.6 el tiempo promedio necesario para llegar a los 2 mL de volumen drenado, volumen en el cual se comenzó el registro en la prueba, cabe aclarar que el tiempo promedio para el producto comercial no se encuentra especificado debido a que se considera que su volumen de drenado fue nulo, al no suceder a lo largo de 40 minutos de evaluación.

De acuerdo al análisis por superficie de respuesta (Anexo 1, Cuadro 4.14), la proporción de polisacárido presente en el sistema afectó significativamente el tiempo inicial de drenado ($P=0.004$), lo que concuerda con lo reportado por Martínez-Padilla et al. (2015) donde se indica una disminución en la velocidad de drenado debida a la capacidad de la GX para mejorar la estabilidad de la espuma,

lo anterior se relaciona con la viscosidad de la fase fluida, que opone mayor resistencia al flujo del líquido. Además, se presenta una interacción estadística de CSL con FA dentro del sistema ($P=0.029$).

Cuadro 3.6. Tiempo de drenado de las espumas obtenidas a partir de muestras preparadas a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones.

Concentración estudiada	Tiempo de drenado, 2 mL (min)
CSL 5%- FA 5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	11.26 (± 2.614)
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	15.11 (± 2.184)
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	8.15 (± 0.913)
CSL 5%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	22.71 (± 7.741)
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	18.42 (± 1.733)
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	8.00 (± 0.558)
CSL 7.5%- FA 7.5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	12.33 (± 0.570)
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.05%- GMK 0.15%	20.84 (± 1.739)
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.15%- GMK 0.05%	10.17 (± 0.600)
CSL 10%- FA 5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	14.66 (± 1.166)
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	15.84 (± 2.353)
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	10.88 (± 1.034)
CSL 10%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	11.99 (± 2.703)

La desviación estándar se indica entre paréntesis.

El volumen de líquido drenado de las espumas con respecto al tiempo (Figura 3.14) no mostró un comportamiento sigmoideal como en el caso de sistemas Leche descremada-CSL evaluados por Martínez-Padilla et al. (2014), sino que al ser distinto tipo de producto, su comportamiento presentó una tendencia lineal, cuya pendiente representa la velocidad de drenado.

Las velocidades de drenado de los sistemas, evaluadas en copas de estabilidad se presentan en el Cuadro 3.7, omitiendo al producto comercial por no presentar drenado. Se registraron valores de 0.068 - 0.614 mL/min, en éstos se identificaron diferencias mínimamente significativas entre los valores dentro del intervalo mencionado (Anexo 1, Cuadro 4.15 y 4.16), las cuales se deben sólo a la interacción estadística entre la concentración de CSL y FA ($P=0.047$), única barra de efectos estandarizados que sobrepasa el nivel de significancia del modelo de superficie de respuesta (Figura 3.15).

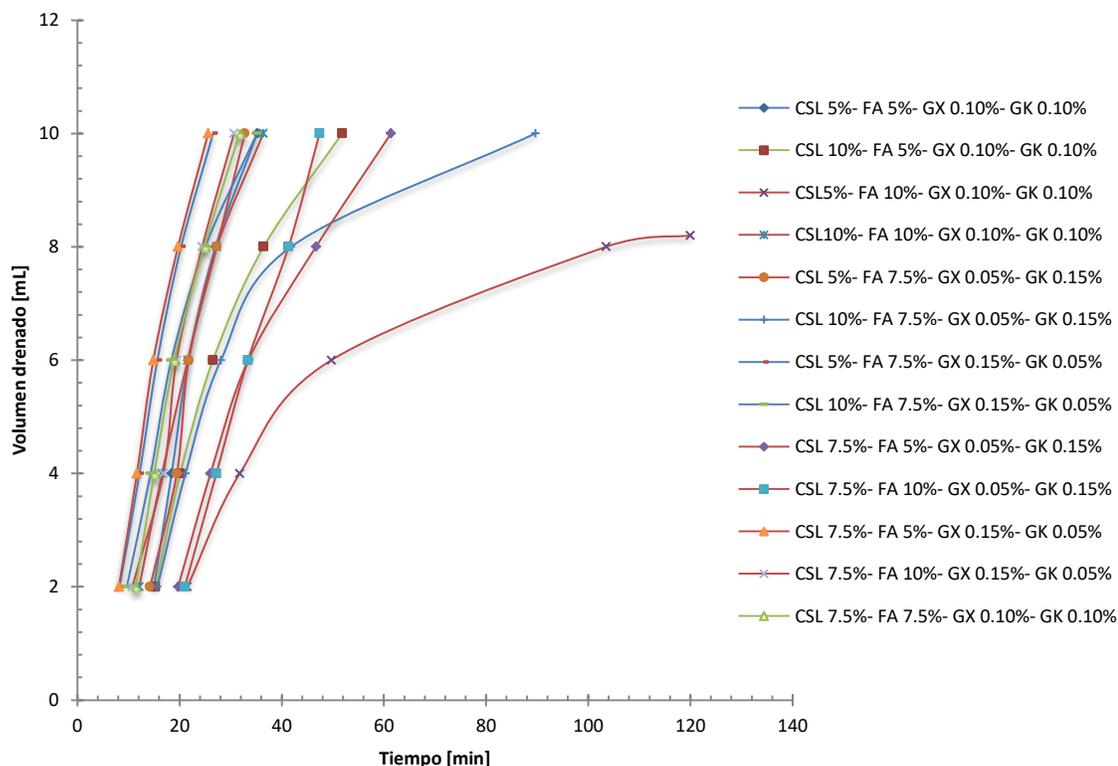


Figura 3.14. Volumen de líquido drenado en función del tiempo en espumas obtenidas a partir de base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones.

Cuadro 3.7. Velocidad de drenado en espumas preparadas a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones.

Concentración estudiada	Velocidad de drenado (mL/min)
CSL 5%- FA 5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.614 ^a (± 0.054)
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.447 ^{a,b,c} (± 0.159)
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.485 ^{a,b,c} (± 0.070)
CSL 5%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.068 ^c (± 0.018)
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.178 ^{b,c} (± 0.066)
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.459 ^{a,b,c} (± 0.046)
CSL 7.5%- FA 7.5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.433 ^{a,b,c} (± 0.111)
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.296 ^{a,b,c} (± 0.139)
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.507 ^{a,b} (± 0.092)
CSL 10%- FA 5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.244 ^{a,b,c} (± 0.028)
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	0.349 ^{a,b,c} (± 0.406)
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	0.344 ^{a,b,c} (± 0.033)
CSL 10%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	0.342 ^{a,b,c} (± 0.174)

La desviación estándar se indica entre paréntesis. Distintos superíndices indican diferencias significativas entre medias aritméticas.

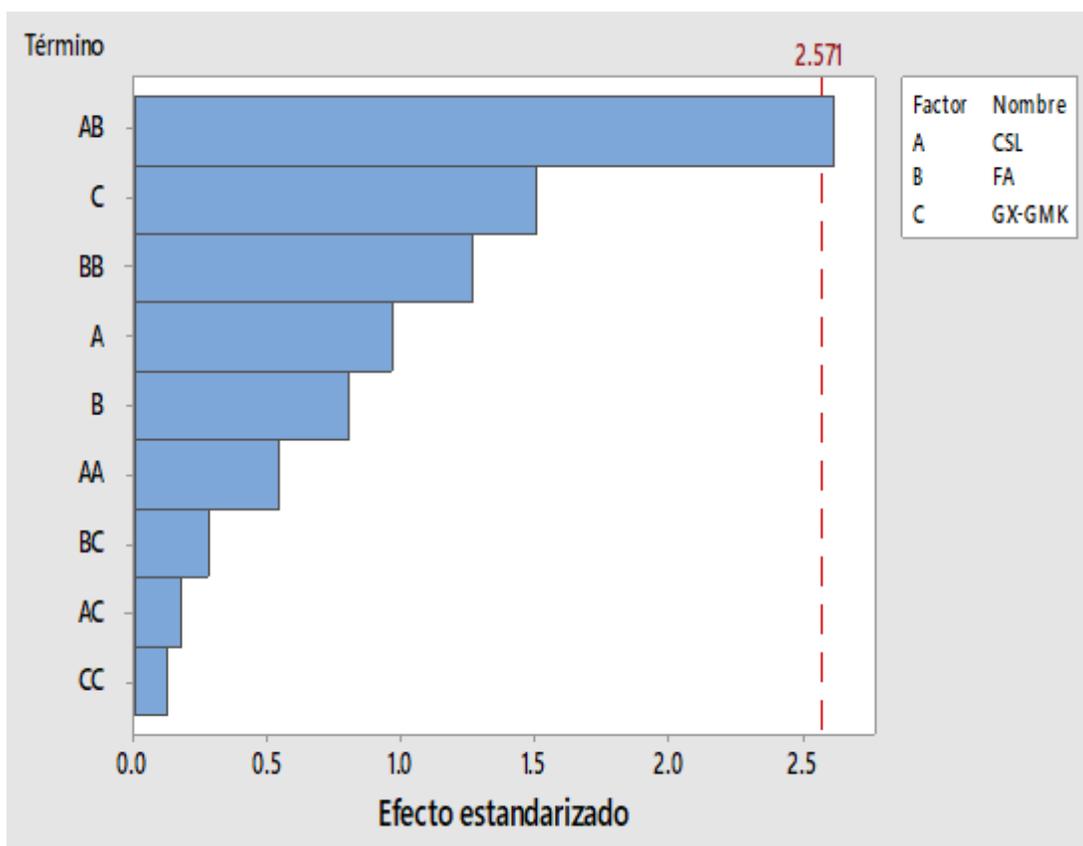


Figura 3.15. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para velocidad de drenado de espumas obtenidas a partir de base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones.

En la representación gráfica por superficie de respuesta (Figura 3.16), tomando un valor fijo intermedio en la proporción de polisacáridos, por ser un factor que estadísticamente no presentó efecto significativo sobre la velocidad de drenado, se puede observar claramente que el aumento en la concentración de CSL en el sistema, aunado a una baja concentración de FA disminuyó la velocidad de drenado, punto mínimo que sería considerado óptimo para el comportamiento deseado del producto.

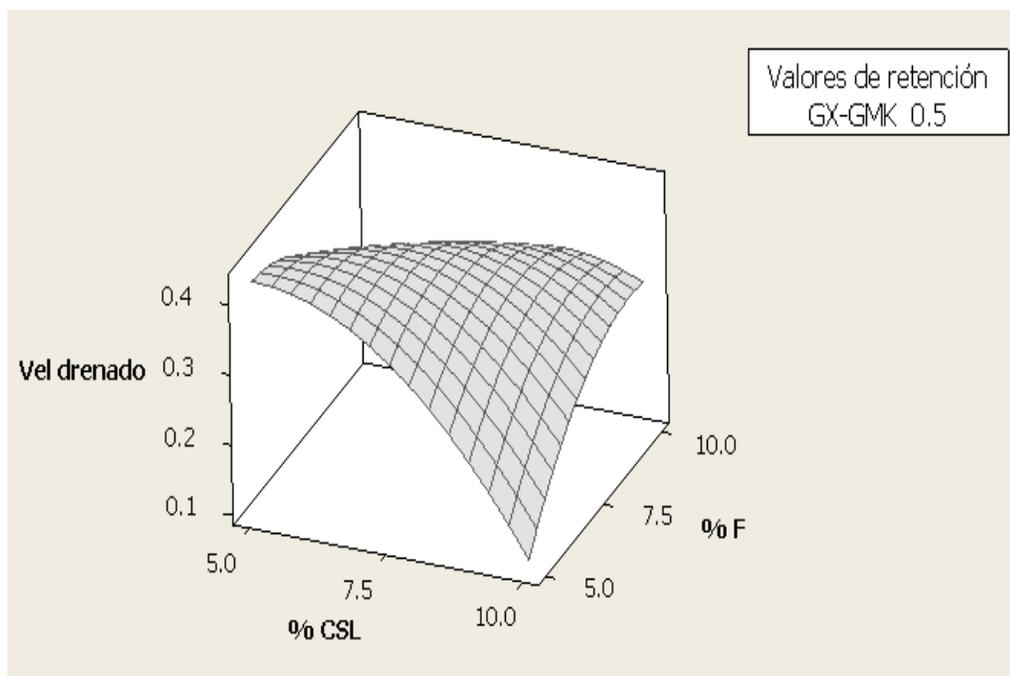


Figura 3.16. Gráfico de superficie de velocidad de drenado de espumas con respecto a su concentración de concentrado de suero de leche (CSL) y fructanos de agave (FA).

3.2.3. Estabilidad por transmisión-retrodispersión de luz

En cuanto al análisis de estabilidad de las espumas por medio de sus perfiles de trasmisión y retrodispersión de luz; de forma general, el aumento de diámetro de burbuja debido a la maduración de Ostwald, se observó en la parte media del tubo como una disminución de la retrodispersión de la luz, con variación entre la altura a la cual se presentó este proceso de inestabilidad.

La cinética de aumento de tamaño de burbuja, vista como una disminución de la retrodispersión de luz (RL) con respecto al tiempo, mostró una tendencia hacia un comportamiento logarítmico (Figura 3.17).

El Cuadro 3.8 contiene las velocidades calculadas del proceso de desestabilización por maduración de Ostwald, a través de la cinética en relación con su modelo de ajuste.

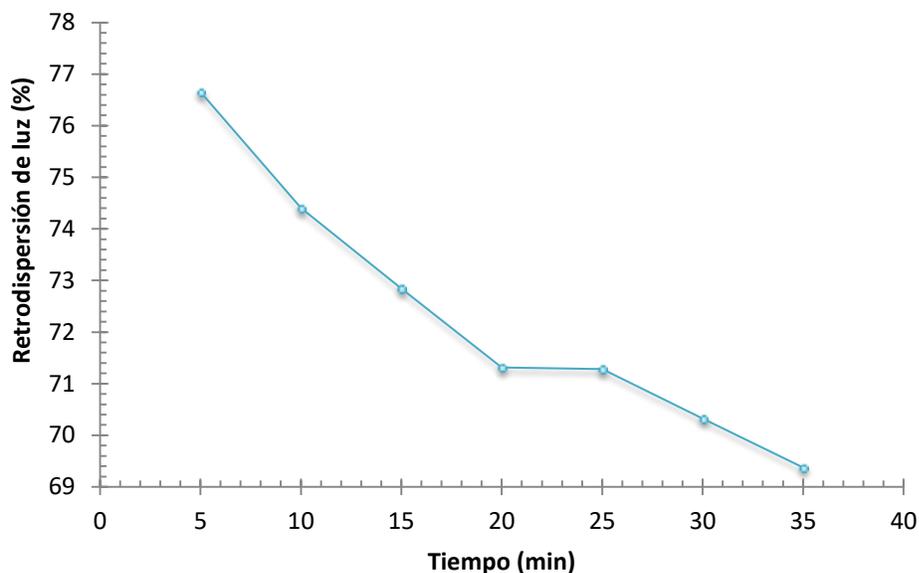


Figura 3.17. Comportamiento observado del perfil de retrodispersión durante la cinética de aumento de tamaño de burbuja en espumas con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones.

Cuadro 3.8. Velocidad de maduración de Ostwald evaluada como disminución de la retrodispersión de luz (RL) en espumas preparadas a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones y de un producto comercial.

Concentración estudiada	Velocidad de maduración de Ostwald [RL (%) /min]
CSL 5%- FA 5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	7.57 ^{a,b,c} (± 0.502)
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	2.44 ^d (± 0.120)
CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	15.68 ^a (± 1.374)
CSL 5%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	5.76 ^{b,c,d} (± 1.395)
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	2.68 ^d (± 0.465)
CSL 7.5%- FA 5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	14.45 ^{a,b} (± 2.479)
CSL 7.5%- FA 7.5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	10.02 ^{a,b,c,d} (± 1.477)
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.05%- GMK 0.15%	1.41 ^d (± 0.056)
CSL 7.5%- FA 10%- GX 0.15%- GMK 0.05%	4.89 ^{b,c,d} (± 0.487)
CSL 10%- FA 5%- GX 0.10%- GMK 0.10%	4.31 ^{c,d} (± 0.688)
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.05%- GMK 0.15%	9.02 ^{a,b,c,d} (± 2.935)
CSL 10%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05%	8.51 ^{a,b,c,d} (± 0.522)
CSL 10%- FA 10%- GX 0.10%- GMK 0.10%	4.80 ^{b,c,d} (± 0.315)
Producto comercial "Slim Fast"	1.83 (± 0.197)

La desviación estándar se indica entre paréntesis. Distintos superíndices indican diferencias significativas entre medias aritméticas.

El valor más alto de la velocidad de maduración de Ostwald se presentó a CSL 5%- FA 7.5%- GX 0.15%- GMK 0.05% (15.68 %/min), con existencia de diferencias mínimamente significativas entre la mayoría de las muestras (Anexo 1, Cuadro 4.19). La Figura 3.18 muestra que la proporción de polisacáridos tuvo un efecto significativo sobre la velocidad de maduración de Ostwald en las espumas estudiadas ($P=0.002$), mostrando velocidades mayores en aquellas con menor proporción de glucomanano de konjac, además, existe una interacción estadística entre dicho factor y la concentración de CSL ($P=0.009$), mientras que la concentración de FA también afectó significativamente.

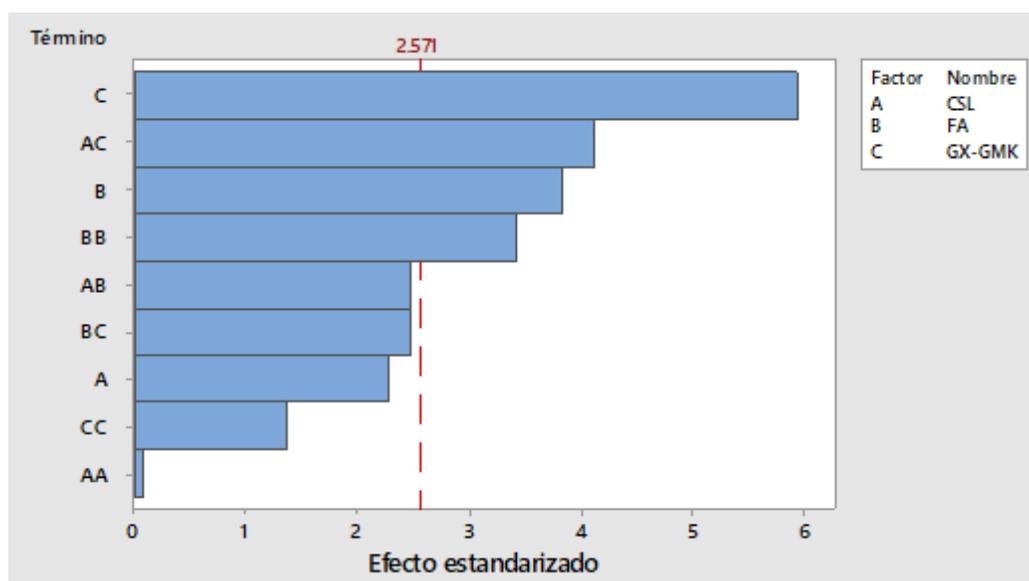


Figura 3.18. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para velocidad de maduración de Ostwald en espumas obtenidas a partir de base para malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones.

3.3. Determinación de la formulación óptima

Finalmente, considerando la capacidad espumante y propiedades de flujo de la fase líquida, así como las propiedades de estabilidad de las espumas obtenidas tras el batido (velocidad de maduración de Ostwald y velocidad de drenado, evaluada volumétricamente) como parámetros de optimización, se realizó un

análisis con ayuda del software Minitab 2017 para determinar la concentración que garantice las características deseadas para el producto (Figura 3.19).

Para la determinación de los niveles óptimos de cada parámetro, se planteó obtener:

- Propiedades de flujo similares a las del producto comercial, tomando los datos obtenidos para éste como valores *objetivo* ($\eta_{@10s}$ en el precizamiento, k, n).
- *Maximizar* la capacidad espumante.
- *Minimizar* la velocidad de drenado y la velocidad de Maduración de Ostwald.

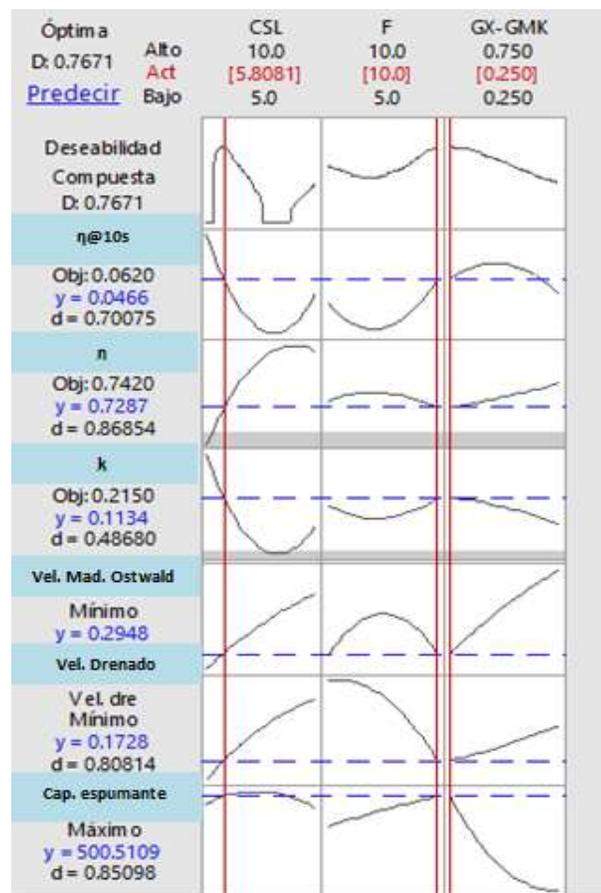


Figura 3.19. Gráfico de optimización con base en propiedades de flujo y estabilidad de espuma obtenida de base líquida de malteada con concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK).

Como se puede visualizar en los valores resaltados en color rojo, CSL 5.8% - FA 10% - GX 0.05% - GMK 0.15% resultó ser la formulación óptima que podría garantizar las propiedades deseadas. La configuración de variables en la gráfica de optimización está asociada con las medias inferidas e intervalos de predicción presentados en el Cuadro 3.9.

Cuadro 3.9. Medias pronosticadas e intervalos de predicción correspondientes a la formulación óptima de malteada a base de concentrado de suero de leche (CSL), fructanos de agave (FA), xantana (GX) y glucomanano de konjac (GMK) a distintas concentraciones y de un producto comercial.

Respuesta	\bar{x} inferidas	Valor probable
$\eta_{@10s}$ (Pa·s)	0.0466	0.0171 - 0.0760
n	0.729	0.5917 - 0.8658
K (Pa·s ⁿ)	0.113	0.110 - 0.3650
Velocidad de maduración de Ostwald (mm/min)	0.29	0.000 - 6.29
Velocidad de drenado (mL/min)	0.173	0.010 - 0.619
Capacidad espumante (%)	500.5	332.8 - 668.2

CONCLUSIONES

Durante la evaluación de las propiedades de la fase líquida se determinó que la concentración de CSL tuvo efecto significativo sobre la reducción en el valor de pH, sin embargo para todos los casos este valor se encontró muy cercano al neutro y por lo tanto alejado del punto isoeléctrico de la β -lactoglobulina, asumiéndose que ésta permaneció soluble y por lo tanto mantuvo su funcionalidad.

El cambio de viscosidad de la fase líquida durante el precizamiento mostró un comportamiento distinto en los sistemas con concentraciones intermedias de CSL, debido a la tendencia de la relación entre el factor y la respuesta hacia un comportamiento en línea curva. El CSL también mostró ser el factor que representa efecto significativo sobre los parámetros reológicos del modelo Herschel-Bulkley, además de presentar interacción con la proporción presente de polisacáridos en el sistema.

El aumento en la viscosidad de la fase líquida, principalmente por la interacción entre la GX y el CSL, propició la disminución de la capacidad espumante al reducir su capacidad de incorporación de aire, con lo cual se observó que aquellos sistemas con mayor proporción de GMK (menor viscosidad) resultaron tener un rendimiento elevado. Además, el aumento de viscosidad, al oponer mayor resistencia al flujo del líquido, se relacionó con las propiedades de estabilidad de la espuma, así, la proporción de polisacárido presente en el sistema afectó de forma significativa el tiempo de drenado debido a la capacidad de la GX para mejorar la estabilidad de la espuma.

Los fructanos de agave en combinación con CSL, xantana y glucomanano de konjac parecen ser ideales para la formación de malteadas funcionales, sin embargo se debe tener especial cuidado en su interacción y concentración de cada factor, ya que una sobresaturación de la interfase puede propiciar la reducción de la capacidad espumante, además de que un elevada concentración de fructanos de agave aumenta la viscosidad de la fase líquida con lo cual aparentemente la espuma es resistente al drenado, sin embargo, esto se debe únicamente a la resistencia que presenta el sistema a fluir.

Cabe resaltar que a través de la optimización se determinó que el nivel alto de FA empleados en este estudio (10%) es favorable para las propiedades del sistema, lo que resulta positivo para las características funcionales del producto propuesto. Producto que se pretende tomar como base para posteriormente ampliar la oferta de sabores ofrecidos al consumidor.

Se recomienda la evaluación de nuevos sistemas elaborados con la concentración que resultó óptima según el análisis estadístico y con variaciones de ésta, basadas en la evaluación de las propiedades de una malteada elaborada de forma convencional, para determinar así la formulación que garantice las características que se buscan para una base líquida para malteada.

Además, si se pretende escalar la producción a un nivel comercial, es necesario llevar a cabo una evaluación sensorial que permita conocer la aceptabilidad del consumidor respecto a las características obtenidas, así como la concentración máxima de FA adecuada y tolerada para el consumo.

REFERENCIAS

- Aranberri, I., Binks, B. P., Clint, J. H., Fletcher, P. D. (2006). Elaboración y caracterización de emulsiones estabilizadas por polímeros y agentes tensioactivos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 7, 211-230.
- Aranceta, J., Serra, L. (2004). *Leche, Lácteos y Salud*. Buenos Aires: Médica Panamericana.
- Augustin, M. y Clarke, P. (2008). Skim milk powders with enhanced foaming and steam-frothing properties. *Dairy Science and Technology*, 88, 149–161.
- Badui, S. (2006). *Química de los Alimentos*. México: Pearson Educación.
- Brunchi, C., Bercea, M., Morariu, S., Dascalu, M. (2016). Some properties of xanthan gum in aqueous solutions: effect of temperature and pH. *Journal of Polymer Research*, 23, 2-8.
- Chua, M., Baldwin, T., Hocking, T. J., Chan, K. (2010). Traditional uses and potential health benefits of *Amorphophallus konjac*. *Journal of Ethnopharmacology*, 128, 268-278.
- Dickinson, E., Walstra, P. (1993). Food Colloids and polymers: stability and mechanical properties. *The Royal Society of Chemistry*, 77-93.
- Dolores-Becerra, M. C. (2017). Efecto de fructanos de agave sobre la formación y estabilidad de espumas a base de proteínas de suero lácteo con goma xantana. Tesis de Ingeniería en Alimentos, FES Cuautitlán, UNAM.
- Fennema, O. (2010). *Química de los Alimentos*. España: Acribia.
- Ferrandini, E., Castillo, M., López, M. y Laencina, J. (2006). Modelos estructurales de la micela de caseína. *Anales de Veterinaria de Murcia*, 22, 5-18.
- Huppertz, T. (2010). Foaming properties of milk: A review of the influence of composition and processing. *International Journal of Dairy Technology*, 63, 447-488.

- González-Canga, N., Fernández-Martínez, A. M., Sahagún, J. J. García-Vieitez, M. J., Díez-Liébana, Á. P., Calle-Pardo, L. J., Castro-Robles, Sierra-Vega, M. (2004). Glucomanano: propiedades y aplicaciones terapéuticas. *Nutrición Hospitalaria*, 19, 45-50.
- Hill, S. (1998). Emulsions and Foams en Hill, S. E., Ledward, D. A., Mitchel, J. R. (Eds.). *Functional Properties of Food Macromolecules*, pp 302-334. Estados Unidos: Aspen Publishers.
- Kamath, S., Huppertz, T., Houlihan, A., Deeth, H. (2008). The influence of temperature on foaming of milk. *International Journal of Dairy Technology*, 18, 994-1002.
- Kinsella, J. (1981). Functional properties of proteins: Possible relationships between structure and function in foams. *Food Chemistry*, 7, 273-288.
- Koenen, M.E., Cruz, R.J.M., Mueller, M., Venema, K. (2016). The effect of agave fructan products on the activity and composition of the microbiota determined in a dynamic in vitro model of the human proximal large intestine. *Journal of Functional Food*, 22, 201-210.
- López, M., Mancilla, N. y Mendoza, G. (2003). Molecular structures of fructans from Agave Tequilana Weber var. azul. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 7835-7840.
- Márquez-Aguirre, A.L., Camacho-Ruiz, R.M., Arriaga-Alba, M., Padilla-Camberos, E., Kirchmayr, M.R., Blasco, J.L., González-Avila, M. (2013). Effects of Agave tequilana fructans with different degree of polymerization profiles on the body weight, blood lipids and count of fecal Lactobacilli/Bifidobacteria in obese mice. *Food and Function*, 4, 1237-1244.
- Martínez-Padilla, L. P., García-Mena, V., Casas-Alencáster, N.B., Sosa-Herrera, M.G. (2014). Foaming properties of skim milk powder fortified with milk proteins. *International Dairy Journal*, 36, 21-28.
- Martínez- Padilla, L. P., García-Rivera, J. L., Romero-Arreola, V., Casas-Alencáster, N. B. (2015). Effects of xanthan gum rheology on the foaming properties of whey protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, 156, 22-30.

- Meyer, D., Blaauwloed, J. P. (2009). Inulin en Phillips, G. O., Williams, P. A. (Eds.). *Handbook of Hydrocolloids*. U.K.: Woodhead Publishing.
- Miller, G., Jarvis, J., McBean, L. (2000). *Handbook of Dairy Foods and Nutrition*. Boca Raton: National Dairy Council.
- McClements, D. J. (2006). Non-covalent interactions between proteins and polysaccharides. *Biotechnology Advances*, 24, 621-625.
- Muñoz, J, Alfaro, M. (2000). Rheological and phase behavior of amphiphilic lipids. *Grasas y Aceites* 51, 6-25.
- Narchi, I., Vial, Ch., Djelveh, G. (2009). Effect of protein-polysaccharide mixtures on the continuous manufacturing of foamed food products. *Food Hydrocolloids*, 23, 188-201.
- Parra, R. (2009). Lactosuero: Importancia en la industria de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 62, 4967-4982.
- Pasquel, A. (2001). Gomas: Una aproximación a la industria de alimentos. *Revista Amazónica de Investigación Alimentaria*, 1–8.
- Phillips, G., Williams, P. (2009). *Handbook of Hydrocolloids*. U.K.: Woodhead Publishing.
- Ritsema, T., Smeekens, S. (2003). Fructans: beneficial for plants and humans. *Current Opinion in Plant Biology*, 6, 223-230.
- Sanchez, C., Schmitt, C., Babak, V.G., Hardy, J., 1997. Rheology of whey protein isolate-xanthan mixed solutions and gels. Effect of pH and xanthan concentration. *Nahrung*, 41, 336–343.
- Sosa-Herrera, M.G., Delgado-Reyes, V.A. (2016). Propiedades funcionales y aplicaciones tecnológicas de fructanos en Ramírez-Ortiz, M. E. (Ed.). *Alimentos Funcionales de Hoy*, pp 97-116. Barcelona, España: OmniaScience.
- Sosa-Herrera, M. G., Martínez-Padilla, L. P., Delgado-Reyes, V.A., Torres-Robledo, A. (2016). Effect of agave fructans on bulk and surface properties of sodium caseinate in aqueous media. *Food Hydrocolloids*, 60, 199-205.

- Vereyken, I., Kuik, J., Evers, T., Rijken, P., Kruijff, B. (2003). Structural Requirements of the Fructan-Lipid Interaction. *Biophysical Journal*, 84, 3177-3154.
- Walstra, P. (2003). Physical Chemistry of Foods. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Wang, Y., Li, Z. y Wei, Y. (2008). Rheology and influence factor of low-concentration Konjac gum solutions. *Journal of Central South University of Technology*, 15, 516-519.
- Yoshimura, M. y Nishinari, K. (1999). Dynamic viscoelastic study on the gelation of konjac glucomannan with different molecular weights. *Food Hydrocolloids*, 13, 227–233.
- Zhang, Z., Dalgleish, D., Goff, H. (2004). Effect of pH and ionic strength on competitive protein adsorption to air / water interfaces in aqueous foams made with mixed milk proteins. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 34, 113–121.
- Zhang, C., Chen, J., y Yang, F. (2014). Konjac glucomannan, a promising polysaccharide for OCDDS. *Carbohydrate Polymers*, 104, 175-181.

ANEXO 1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS

Los números presentados como “Concentración” en las tablas de Agrupación por el método de Tukey corresponden al orden de las corridas del diseño experimental generado en el software estadístico (Cuadro 2.1).

Propiedades de la fase líquida

- pH

Cuadro 4.1. Análisis de Varianza de una vía y prueba de Tukey para pH de la fase líquida.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Concentración	12	0.10447	0.008706	5.80	0.000
Error	26	0.03900	0.001500		
Total	38	0.14347			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0387298	72.82%	60.27%	38.84%

Cuadro 4.2. Agrupación por el método de Tukey y una confianza de 95% para pH de la fase líquida.

Concentración	N	Media	Agrupación
1	3	6.60667	A
7	3	6.5833	A B
5	3	6.5667	A B C
8	3	6.5533	A B C D
9	3	6.5467	A B C D
3	3	6.52667	A B C D
11	3	6.49333	A B C D
13	3	6.4900	B C D
10	3	6.4800	B C D
12	3	6.47333	B C D
6	3	6.4600	C D
4	3	6.4533	C D
2	3	6.4400	D

Cuadro 4.3. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para pH de la fase líquida.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	9	0.028875	0.003208	3.26	0.103
Lineal	3	0.019875	0.006625	6.73	0.033
CSL	1	0.017113	0.017113	17.37	0.009
F	1	0.002450	0.002450	2.49	0.176
GX-GMK	1	0.000313	0.000313	0.32	0.598
Cuadrado	3	0.005450	0.001817	1.84	0.256
CSL*CSL	1	0.003323	0.003323	3.37	0.126
F*F	1	0.000577	0.000577	0.59	0.479
GX-GMK*GX-GMK	1	0.001477	0.001477	1.50	0.275
Interacción de 2 factores	3	0.003550	0.001183	1.20	0.399
CSL*F	1	0.002025	0.002025	2.06	0.211
CSL*GX-GMK	1	0.000900	0.000900	0.91	0.383
F*GX-GMK	1	0.000625	0.000625	0.63	0.462
Error	5	0.004925	0.000985		
Falta de ajuste	3	0.004925	0.001642	*	*
Error puro	2	0.000000	0.000000		
Total	14	0.033800			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0313847	85.43%	59.20%	0.00%

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\text{pH} = 7.274 - 0.1295 \text{ CSL} - 0.0140 \text{ F} - 0.625 \text{ GX-GMK} + 0.00480 \text{ CSL*CSL} - 0.00200 \text{ F*F} + 0.320 \text{ GX-GMK*GX-GMK} + 0.00360 \text{ CSL*F} + 0.0240 \text{ CSL*GX-GMK} + 0.0200 \text{ F*GX-GMK}$$

- **Propiedades de flujo**
- **Viscosidad al inicio del precizamiento (10s)**

Cuadro 4.4. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para viscosidad de la fase líquida al inicio del precizamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	0.006437	0.000715	13.19	0.012
Lineal	3	0.000130	0.000043	0.80	0.556
CSL	1	0.000054	0.000054	1.00	0.375
FA	1	0.000031	0.000031	0.57	0.492
GX-GMK	1	0.000004	0.000004	0.06	0.812
Cuadrado	3	0.004317	0.001439	26.54	0.004
CSL*CSL	1	0.003763	0.003763	69.41	0.001
FA*FA	1	0.001211	0.001211	22.34	0.009
GX-GMK*GX-GMK	1	0.000470	0.000470	8.67	0.042
Interacción de 2 factores	3	0.000267	0.000089	1.64	0.315
CSL*FA	1	0.000073	0.000073	1.34	0.311
CSL*GX-GMK	1	0.000193	0.000193	3.56	0.132
FA*GX-GMK	1	0.000000	0.000000	0.01	0.934
Error	4	0.000217	0.000054		
Falta de ajuste	2	0.000217	0.000108	*	*
Error puro	2	0.000000	0.000000		
Total	13	0.006654			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0073635	96.74%	89.41%	*

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Visc.} &= 0.4503 - 0.0846 \text{ CSL} - 0.0403 \text{ FA} + 0.1156 \text{ GX-GMK} + 0.005667 \text{ CSL*CSL} \\
 \text{a} &+ 0.003215 \text{ FA*FA} - 0.2003 \text{ GX-GMK*GX-GMK} - 0.000966 \text{ CSL*FA} \\
 \text{10s} &+ 0.01112 \text{ CSL*GX-GMK} + 0.00052 \text{ FA*GX-GMK}
 \end{aligned}$$

- **Esfuerzo de cedencia**

Cuadro 4.5. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para esfuerzo de cedencia de la fase líquida.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	9	0.532131	0.059126	2.60	0.185
Lineal	3	0.196081	0.065360	2.88	0.167
CSL	1	0.000919	0.000919	0.04	0.850
F	1	0.008802	0.008802	0.39	0.567
GX-GMK	1	0.183013	0.183013	8.06	0.047
Cuadrado	3	0.273180	0.091060	4.01	0.107
CSL*CSL	1	0.271126	0.271126	11.94	0.026
F*F	1	0.016042	0.016042	0.71	0.448
GX-GMK*GX-GMK	1	0.011954	0.011954	0.53	0.508
Interacción de 2 factores	3	0.027478	0.009159	0.40	0.759
CSL*F	1	0.023653	0.023653	1.04	0.365
CSL*GX-GMK	1	0.000225	0.000225	0.01	0.925
F*GX-GMK	1	0.003600	0.003600	0.16	0.711
Error	4	0.090819	0.022705		
Falta de ajuste	2	0.090819	0.045409	*	*
Error puro	2	0.000000	0.000000		
Total	13	0.622950			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.150681	85.42%	52.62%	*

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\sigma_0 = 3.91 - 0.851 \text{ CSL} - 0.314 \text{ F} + 1.34 \text{ GX-GMK} + 0.0481 \text{ CSL*CSL} + 0.0117 \text{ F*F} - 1.01 \text{ GX-GMK*GX-GMK} + 0.0174 \text{ CSL*F} - 0.012 \text{ CSL*GX-GMK} + 0.048 \text{ F*GX-GMK}$$

- Índice de consistencia

Cuadro 4.6. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para índice de consistencia de la fase líquida.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	9	0.053505	0.005945	1.50	0.369
Lineal	3	0.002830	0.000943	0.24	0.866
CSL	1	0.000037	0.000037	0.01	0.928
F	1	0.002214	0.002214	0.56	0.496
GX-GMK	1	0.000512	0.000512	0.13	0.737
Cuadrado	3	0.034735	0.011578	2.92	0.164
CSL*CSL	1	0.034588	0.034588	8.73	0.042
F*F	1	0.002768	0.002768	0.70	0.450
GX-GMK*GX-GMK	1	0.000186	0.000186	0.05	0.839
Interacción de 2 factores	3	0.006870	0.002290	0.58	0.660
CSL*F	1	0.001540	0.001540	0.39	0.567
CSL*GX-GMK	1	0.005041	0.005041	1.27	0.322
F*GX-GMK	1	0.000289	0.000289	0.07	0.800
Error	4	0.015854	0.003964		
Falta de ajuste	2	0.015854	0.007927	*	*
Error puro	2	0.000000	0.000000		
Total	13	0.069359			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0629568	77.14%	25.71%	*

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$k = 1.191 - 0.254 \text{ CSL} - 0.041 \text{ F} - 0.166 \text{ GX-GMK} + 0.01718 \text{ CSL*CSL} + 0.00486 \text{ F*F} - 0.126 \text{ GX-GMK*GX-GMK} - 0.00444 \text{ CSL*F} + 0.0568 \text{ CSL*GX-GMK} - 0.0136 \text{ F*GX-GMK}$$

- Índice de comportamiento al flujo

Cuadro 4.7. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para índice de comportamiento al flujo de la fase líquida.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	9	0.134387	0.014932	12.70	0.013
Lineal	3	0.039779	0.013260	11.27	0.020
CSL	1	0.037744	0.037744	32.09	0.005
F	1	0.002214	0.002214	1.88	0.242
GX-GMK	1	0.001682	0.001682	1.43	0.298
Cuadrado	3	0.064194	0.021398	18.19	0.009
CSL*CSL	1	0.063511	0.063511	54.00	0.002
F*F	1	0.005167	0.005167	4.39	0.104
GX-GMK*GX-GMK	1	0.000068	0.000068	0.06	0.822
Interacción de 2 factores	3	0.019193	0.006398	5.44	0.068
CSL*F	1	0.001301	0.001301	1.11	0.352
CSL*GX-GMK	1	0.016770	0.016770	14.26	0.020
F*GX-GMK	1	0.001122	0.001122	0.95	0.384
Error	4	0.004705	0.001176		
Falta de ajuste	2	0.004705	0.002352	*	*
Error puro	2	0.000000	0.000000		
Total	13	0.139092			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0342956	96.62%	89.01%	*

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$n = -1.075 + 0.4041 \text{ CSL} + 0.0637 \text{ F} + 0.442 \text{ GX-GMK} - 0.02328 \text{ CSL*CSL} - 0.00664 \text{ F*F} + 0.076 \text{ GX-GMK*GX-GMK} + 0.00408 \text{ CSL*F} - 0.1036 \text{ CSL*GX-GMK} + 0.0268 \text{ F*GX-GMK}$$

- **Capacidad espumante**

Cuadro 4.8. Análisis de Varianza de una vía y prueba de Tukey para capacidad espumante de la fase líquida.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Concentración	12	196545	16378.7	19.05	0.000
Error	26	22353	859.7		
Total	38	218898			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
29.3214	89.79%	85.08%	77.02%

Cuadro 4.9. Agrupación por el método de Tukey y una confianza de 95% para capacidad espumante de la fase líquida.

Concentración	N	Media	Agrupación
10	3	540.0	A
9	3	500.0	A B
6	3	461.1	A B C
11	3	422.2	B C D
5	3	403.4	C D
1	3	397.78	C D
7	3	386.1	C D
13	3	385.3	C D
8	3	374.96	C D
3	3	372.22	D E
2	3	360.0	D E F
4	3	287.2	E F
12	3	275.00	F

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Cuadro 4.10. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para capacidad espumante de la fase líquida.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	9	55012.2	6112.5	2.84	0.131
Lineal	3	30907.1	10302.4	4.79	0.062
CSL	1	726.4	726.4	0.34	0.586
F	1	5283.9	5283.9	2.46	0.178
GX-GMK	1	24896.8	24896.8	11.58	0.019
Cuadrado	3	13600.9	4533.6	2.11	0.218
CSL*CSL	1	3203.7	3203.7	1.49	0.277
F*F	1	8.7	8.7	0.00	0.952
GX-GMK*GX-GMK	1	9436.4	9436.4	4.39	0.090
Interacción de 2 factores	3	10504.2	3501.4	1.63	0.295
CSL*F	1	558.4	558.4	0.26	0.632
CSL*GX-GMK	1	1183.0	1183.0	0.55	0.492
F*GX-GMK	1	8762.8	8762.8	4.07	0.100
Error	5	10753.5	2150.7		
Falta de ajuste	3	10753.5	3584.5	*	*
Error puro	2	0.0	0.0		
Total	14	65765.7			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
46.3756	83.65%	54.22%	0.00%

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

Cap. espumante = 35 + 94.8 CSL + 45.0 F - 264 GX-GMK - 4.71 CSL*CSL - 0.25 F*F + 809 GX-GMK*GX-GMK - 1.89 CSL*F - 27.5 CSL*GX-GMK - 74.9 F*GX-GMK

Propiedades de la espuma

- Densidad

Cuadro 4.11. Análisis de Varianza de una vía y prueba de Tukey para densidad de la espuma.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Concentración	12	0.06396	0.005330	6.30	0.000
Error	26	0.02200	0.000846		
Total	38	0.08596			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0290918	74.40%	62.59%	42.40%

Cuadro 4.12. Agrupación por el método de Tukey y una confianza de 95% para densidad de la espuma.

Concentración	N	Media	Agrupación
12	3	0.34400	A
2	3	0.34000	A B
4	3	0.3270	A B C
3	3	0.28900	A B C D
8	3	0.26767	A B C D
6	3	0.2593	A B C D
5	3	0.25800	A B C D
7	3	0.25400	B C D
13	3	0.24900	C D
1	3	0.24533	C D
11	3	0.23467	D
10	3	0.22400	D
9	3	0.22100	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Cuadro 4.13. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para densidad de la espuma.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	9	0.018808	0.002090	1.99	0.231
Lineal	3	0.007989	0.002663	2.54	0.170
CSL	1	0.003160	0.003160	3.02	0.143
F	1	0.002812	0.002812	2.68	0.162
GX-GMK	1	0.002016	0.002016	1.92	0.224
Cuadrado	3	0.007467	0.002489	2.37	0.187
CSL*CSL	1	0.004523	0.004523	4.32	0.092
F*F	1	0.002544	0.002544	2.43	0.180
GX-GMK*GX-GMK	1	0.000447	0.000447	0.43	0.543
Interacción de 2 factores	3	0.003352	0.001117	1.07	0.442
CSL*F	1	0.000600	0.000600	0.57	0.483
CSL*GX-GMK	1	0.000100	0.000100	0.10	0.770
F*GX-GMK	1	0.002652	0.002652	2.53	0.173
Error	5	0.005240	0.001048		
Falta de ajuste	3	0.005240	0.001747	*	*
Error puro	2	0.000000	0.000000		
Total	14	0.024048			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0323736	78.21%	38.99%	0.00%

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\text{Densidad} = 0.615 - 0.0574 \text{ CSL} - 0.0614 \text{ F} - 0.010 \text{ GX-GMK} + 0.00560 \text{ CSL*CSL} + 0.00420 \text{ F*F} - 0.176 \text{ GX-GMK*GX-GMK} - 0.00196 \text{ CSL*F} - 0.0080 \text{ CSL*GX-GMK} + 0.0412 \text{ F*GX-GMK}$$

- **Drenado**

Cuadro 4.14. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para drenado de los primeros 2 mL de espuma.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	232.895	25.877	4.75	0.050
Lineal	3	160.415	53.472	9.82	0.015
CSL	1	1.862	1.862	0.34	0.584
FA	1	22.345	22.345	4.10	0.099
GX-GMK	1	136.208	136.208	25.01	0.004
Cuadrado	3	21.621	7.207	1.32	0.365
CSL*CSL	1	0.855	0.855	0.16	0.708
FA*FA	1	20.282	20.282	3.72	0.112
GX-GMK*GX-GMK	1	0.369	0.369	0.07	0.805
Interacción de 2 factores	3	50.859	16.953	3.11	0.127
CSL*FA	1	49.844	49.844	9.15	0.029
CSL*GX-GMK	1	1.000	1.000	0.18	0.686
FA*GX-GMK	1	0.016	0.016	0.00	0.959
Error	5	27.232	5.446		
Falta de ajuste	3	27.232	9.077	*	*
Error puro	2	0.000	0.000		
Total	14	260.126			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
2.33374	89.53%	70.69%	0.00%

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned} \text{Tiempo a 2mL} = & 12.0 + 2.49 \text{ CSL} - 0.67 \text{ FA} - 16.7 \text{ GX-GMK} + 0.077 \text{ CSL*CSL} + 0.375 \text{ FA*FA} \\ & - 5.1 \text{ GX-GMK*GX-GMK} - 0.565 \text{ CSL*FA} + 0.80 \text{ CSL*GX-GMK} - 0.10 \text{ FA*GX-GMK} \end{aligned}$$

- **Velocidad de drenado**

Cuadro 4.15. Análisis de Varianza de una vía y prueba de Tukey para velocidad de drenado de la espuma.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Concentración	12	0.7821	0.06518	3.06	0.008
Error	26	0.5546	0.02133		
Total	38	1.3367			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.146045	58.51%	39.36%	6.65%

Cuadro 4.16. Agrupación por el método de Tukey y una confianza de 95% para velocidad de drenado de la espuma.

Concentración	N	Media	Agrupación
1	3	0.6137	A
12	3	0.5074	A B
7	3	0.4852	A B C
11	3	0.4590	A B C
5	3	0.4466	A B C
13	3	0.4330	A B C
6	3	0.349	A B C
8	3	0.3436	A B C
4	3	0.342	A B C
10	3	0.2959	A B C
2	3	0.2435	A B C
9	3	0.1784	B C
3	3	0.0676	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Cuadro 4.17. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para velocidad de drenado de la espuma.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	9	0.192428	0.021381	1.41	0.369
Lineal	3	0.058440	0.019480	1.28	0.376
CSL	1	0.014028	0.014028	0.92	0.381
F	1	0.009919	0.009919	0.65	0.456
GX-GMK	1	0.034493	0.034493	2.27	0.192
Cuadrado	3	0.028433	0.009478	0.62	0.630
CSL*CSL	1	0.004572	0.004572	0.30	0.607
F*F	1	0.024293	0.024293	1.60	0.262
GX-GMK*GX-GMK	1	0.000254	0.000254	0.02	0.902
Interacción de 2 factores	3	0.105555	0.035185	2.32	0.193
CSL*F	1	0.103877	0.103877	6.84	0.047
CSL*GX-GMK	1	0.000484	0.000484	0.03	0.865
F*GX-GMK	1	0.001194	0.001194	0.08	0.790
Error	5	0.075942	0.015188		
Falta de ajuste	3	0.075942	0.025314	*	*
Error puro	2	0.000000	0.000000		
Total	14	0.268370			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.123241	71.70%	20.77%	0.00%

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned} \text{Vel. drenado} = & 0.80 - 0.117 \text{ CSL} + 0.001 \text{ F} + 0.47 \text{ GX-GMK} - 0.0056 \text{ CSL*CSL} - 0.0130 \text{ F*F} \\ & + 0.13 \text{ GX-GMK*GX-GMK} + 0.02578 \text{ CSL*F} - 0.0176 \text{ CSL*GX-GMK} - \\ & 0.0276 \text{ F*GX-GMK} \end{aligned}$$

- **Velocidad de Maduración de Ostwald**

Cuadro 4.18. Análisis de Varianza de una vía y prueba de Tukey para velocidad de maduración de Ostwald de la espuma.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Concentración	12	825.4	68.78	6.38	0.000
Error	26	280.2	10.78		
Total	38	1105.6			

Resumen del modelo

S	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
3.28283	74.66%	62.96%

Cuadro 4.19. Agrupación por el método de Tukey y una confianza de 95% para velocidad de maduración de Ostwald de la espuma.

Concentración	N	Media	Agrupación
7	3	15.680	A
11	3	14.45	A B
1	3	13.57	A B C
13	3	10.02	A B C D
6	3	9.02	A B C D
8	3	8.514	A B C D
3	3	5.764	B C D
12	3	4.890	B C D
4	3	4.797	B C D
2	3	4.306	C D
9	3	2.677	D
5	3	2.4367	D
10	3	1.4070	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Cuadro 4.20. Análisis de Varianza por superficie de respuesta para velocidad de maduración de Ostwald de la espuma.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	9	272.118	30.2353	10.82	0.009
Lineal	3	153.725	51.2417	18.34	0.004
CSL	1	14.617	14.6170	5.23	0.071
F	1	41.155	41.1551	14.73	0.012
GX-GMK	1	97.953	97.9531	35.05	0.002
Cuadrado	3	36.741	12.2469	4.38	0.073
CSL*CSL	1	0.020	0.0197	0.01	0.936
F*F	1	32.871	32.8709	11.76	0.019
GX-GMK*GX-GMK	1	5.144	5.1437	1.84	0.233
Interacción de 2 factores	3	81.652	27.2173	9.74	0.016
CSL*F	1	17.210	17.2101	6.16	0.056
CSL*GX-GMK	1	47.261	47.2608	16.91	0.009
F*GX-GMK	1	17.181	17.1810	6.15	0.056
Error	5	13.974	2.7947		
Falta de ajuste	3	13.974	4.6579	*	*
Error puro	2	0.000	0.0000		
Total	14	286.091			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.67174	95.12%	86.32%	21.85%

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned} \text{Velocidad de Mad Ostwald} = & -31.4 - 0.46 \text{ CSL} + 5.42 \text{ F} + 99.0 \text{ GX-GMK} + 0.012 \text{ CSL*CSL} - 0.477 \text{ F*F} \\ & - 18.9 \text{ GX-GMK*GX-GMK} + 0.332 \text{ CSL*F} - 5.50 \text{ CSL*GX-GMK} - 3.32 \text{ F*GX-GMK} \end{aligned}$$