



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE
INGREDIENTES EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS,
TEXTURALES Y ESTABILIDAD DE CREMA BATIDA
VEGETAL CON ALMIDÓN LIPOFÍLICO.**

TESIS

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

PRESENTA :

PAULINA TREJO URIBE

ASESORAS:

I. B. Q. NORMA BEATRÍZ CASAS ALENCÁSTER.

I. A. MIRIAM EDITH FUENTES ROMERO

CUAUTITLÁN IZC., EDO. DE MEX. 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

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

U. N. A. M.
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

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

**ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.**



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

Influencia de la concentración de ingredientes en las propiedades físicas, texturales y estabilidad de crema batida vegetal con almidón lipofílico

Que presenta la pasante: Paulina Trejo Uribe

Con número de cuenta: 409021387 para obtener el Título de: Ingeniera en Alimentos

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

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 01 de Septiembre de 2014.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	I.B.Q. Norma Beatriz Casas Alencaster	
VOCAL	I.A. Laura Margarita Cortazar Figueroa	
SECRETARIO	I.A. Patricia Muñoz Aguilar	
1er. SUPLENTE	Dra. María Guadalupe Sosa Herrera	
2do. SUPLENTE	M. en C. Enrique Fuentes Prado	

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

AGRADECIMIENTOS

A mi madre. Por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, sus consejos y cuidados. Por ser la mejor mamá, por estar siempre ahí para mí, porque mis logros son tuyos también.

A mi padre, por su apoyo y consejos.

A mi hermana, por su particular modo de apoyarme y de darme consejos.

A mis tías, por sus consejos y ayuda.

A mis amigas, por hacer cada etapa de mi vida particularmente especial, por soportarme y hacerme reír, por todo el tiempo que pasamos juntas, por todas las locuras. Issis, Gema, Alicia, Cess, Yocelyn, Jacky, Itzel, Sara, a todas muchas gracias.

Amiga Luz! Gracias por ser mi amiga, por ayudarme en las buenas y en las malas, por tantos momentos locos.

Profesora Norma. Por ser una excelente profesora y guía en este proyecto. Por todo el tiempo que dedica a sus alumnos, por su paciencia.

Profesora Edith. Por sus consejos y apoyo.

A todas las profesoras del Lapryfal por su compromiso con sus alumnos, por ser guías y consejeras.

A mis abuelos (Q. E. P. D.). Porque donde quiera que estén sé que me cuidan.

A la DGAPA-UNAM, Programa de apoyo a proyectos para la innovación y mejoramiento de la enseñanza, PAPIME PE101313 “Fortalecimiento de la enseñanza en la determinación de estabilidad de sistemas dispersos en el Taller Multidisciplinario de Reología y Textura en Alimentos”, por el apoyo financiero para el desarrollo de este proyecto.

“Por mi raza hablará el espíritu.”

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE CUADROS	viii
RESUMEN	xi
INTRODUCCIÓN	xii
CAPÍTULO I	
ANTECEDENTES	
1.1 Emulsión	1
1.1.1 Formación de emulsiones	2
1.1.2 Estructura y propiedades físicas de la grasa en una emulsión	4
1.1.3 Factores que afectan la formación de una emulsión	5
1.1.4 Emulsificantes	6
1.1.4.1 Emulsificantes de bajo peso molecular	8
1.1.4.2 Emulsificantes de alto peso molecular	9
1.1.4.2.1 Proteínas (leche, suero de leche)	9
1.1.4.3 Interacciones proteína-emulsificante de bajo peso molecular	12
1.1.4.4 Almidones lipofílicos	12
1.1.5 Estabilizantes de emulsiones	16
1.1.5.1 Gomas	16
1.1.5.2 Goma xantana	17
1.1.6 Desestabilización de emulsiones	18
1.1.7 Usos de las emulsiones	19
1.1.8 Crema	20
1.1.8.1 Tipos de crema	20
1.1.9 Crema para batir	21
1.1.9.1 Tipos de crema para batir	22
1.2 Crema batida	22
1.2.1 Proceso de formación de la crema batida	23
1.2.1.1 Emulsión base	23
1.2.1.2 Formación de la crema batida	24
1.2.2 Coalescencia parcial	26
1.2.3 Estructura de la crema batida	27
1.3 Factores que influyen en la estabilidad de la crema batida	29
1.3.1 Tipo de grasa	29
1.3.1.1 Grasa vegetal	29
1.3.2 Tipo de emulsificantes	30
1.3.2.1 Emulsificantes de bajo peso molecular	31
1.3.2.2 Proteínas	32
1.3.3 Estabilizantes de la crema batida	32

1.3.3.1 Polisacáridos	33
1.3.4 Proceso de elaboración	33
1.4 Mecanismos de desestabilización de las cremas batidas	34
1.4.1 Drenado	34
1.4.2 Maduración de Ostwald	35
1.4.3 Difusión de gas y colapso de la espuma	35
1.5 Estudios realizados con cremas batidas	37
1.6 Pruebas en emulsiones y cremas batidas	40
1.6.1 Pruebas para emulsiones	40
1.6.1.1 Reología	40
1.6.1.2 Tamaño de partícula	41
1.6.1.3 Estabilidad	42
1.6.2 Pruebas para cremas batidas	43
1.6.2.1 Tamaño de burbuja	43
1.6.2.2 Densidad	44
1.6.2.3 Textura	45
1.6.2.4 Estabilidad	46

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Objetivos general y particulares	47
2.2 Diseño experimental	48
2.3 Materiales	49
2.4 Elaboración de la emulsión base	49
2.5 Elaboración de la crema batida	50
2.6 Pruebas para la emulsión base	52
2.6.1 Tamaño de partícula	52
2.6.2 Comportamiento al flujo	53
2.6.3 Estabilidad al clarificado	53
2.7 Pruebas para la crema batida	55
2.7.1 Rendimiento	55
2.7.2 Densidad	56
2.7.3 Tamaño de burbuja	56
2.7.4 Propiedades texturales	57
2.7.4.1 Adhesividad por penetración y retirada	57
2.7.4.2 Extrusión positiva	58
2.7.5 Estabilidad	58

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Objetivo particular 1	59
3.1.1 Emulsión base. Efecto de la concentración de goma xantana	59
3.1.1.1 Comportamiento al flujo	59
3.1.1.2 Tamaño de partícula	62
3.1.1.3 Estabilidad por retrodispersión-transmisión de luz	64
3.1.2 Crema batida. Efecto de la concentración de goma xantana	66
3.1.2.1 Tiempo de batido y rendimiento	66
3.1.2.2 Densidad	67
3.1.2.3 Tamaño de burbuja	68
3.1.2.4 Propiedades texturales	69
3.1.2.5 Estabilidad por retrodispersión-transmisión de luz	70
3.2 Objetivo particular 2	72
3.2.1 Emulsión base. Efecto de la concentración de almidón lipofílico	72
3.2.1.1 Comportamiento al flujo	72
3.2.1.2 Tamaño de partícula	75
3.2.1.3 Estabilidad	77
3.2.2 Crema batida. Efecto de la concentración de almidón lipofílico	78
3.2.2.1 Tiempo de batido y rendimiento	78
3.2.2.2 Densidad	79
3.2.2.3 Tamaño de burbuja	80
3.2.2.4 Propiedades texturales	80
3.2.2.5 Estabilidad por retrodispersión-transmisión	82
3.3 Objetivo particular 3	83
3.3.1 Emulsión base. Efecto de la concentración de leche descremada	83
3.3.1.1 Comportamiento al flujo	83
3.3.1.2 Tamaño de partícula	85
3.3.1.3 Estabilidad por retrodispersión-transmisión de luz	86
3.3.2 Crema batida. Efecto de la concentración de leche descremada	88
3.3.2.1 Tiempo de batido y rendimiento	88
3.3.2.2 Densidad	88
3.3.2.3 Tamaño de burbuja	89
3.3.2.4 Propiedades texturales	89
3.3.2.5 Estabilidad por retrodispersión-transmisión de luz	90
3.4 Objetivo particular 4	92
3.4.1 Emulsión base. Efecto de la concentración de grasa vegetal	92
3.4.1.1 Comportamiento al flujo	92
3.4.1.2 Tamaño de partícula	94
3.4.1.3 Estabilidad por retrodispersión-transmisión de luz	95

3.4.2 Crema batida. Efecto de la concentración de grasa vegetal	97
3.4.2.1 Tiempo de batido y rendimiento	97
3.4.2.2 Densidad	97
3.4.2.3 Tamaño de burbuja	98
3.4.2.4 Propiedades texturales	98
3.4.2.5 Estabilidad por retrodispersión-transmisión de luz	100
3.5 Objetivo particular 5	101
3.5.1 Emulsión base. Efecto de la concentración de suero de leche	101
3.5.1.1 Comportamiento al flujo	101
3.5.1.2 Tamaño de partícula	104
3.5.1.3 Estabilidad por retrodispersión-transmisión de luz	105
3.5.2 Crema batida. Efecto de la concentración de suero de leche	107
3.5.2.1 Tiempo de batido y rendimiento	107
3.5.2.2 Densidad	108
3.5.2.3 Tamaño de burbuja	108
3.5.2.4 Propiedades texturales	109
3.5.2.5 Estabilidad por retrodispersión-transmisión de luz	110
3.5.2.6 Extrusión	111
3.6 Comparación de todos los objetivos	112
CONCLUSIONES	118
BIBLIOGRAFÍA	120
ANEXO	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1 Ejemplo de una emulsión aceite en agua, donde la fase discontinua está representada por los glóbulos de aceite.	1
2 Tipos de emulsiones.	2
3 Etapas de la homogeneización de una emulsión.	3
4 Orientación y conformación en la interfase de las moléculas de superficie activa.	7
5 Efecto Gibbs-Marangoni.	9
6 Esquema de la estructura y la composición química de amilosa y amilopectina.	13
7 Almidón de maíz. Las zonas amorfas representan los gránulos del almidón.	13
8 Estructura del almidón modificado con anhídrido octenil succínico.	14
9 Estructura de la goma xantana.	17
10 Esquema de los procesos de floculación, coalescencia y separación en dos fases de una emulsión.	19
11 Esquema de la formación de la crema batida.	26
12 Coalescencia parcial de gotas parcialmente cristalizadas.	27
13 Ilustración tridimensional de la estructura de la crema batida.	28
14 Micrografía electrónica de barrido de una burbuja de aire de una muestra de crema batida.	28
15 Diagrama de drenado del líquido entre las burbujas de aire.	36
16 Esquema del principio de la difracción de un rayo de luz.	42
17 Fenómenos de transmisión y retrodispersión.	43
18 Diagrama de proceso para la obtención de la emulsión base.	50
19 Diagrama de proceso para la elaboración de la crema batida.	51
20 Batidora Kitchen Aid con el batidor de globo.	51
21 Curvas diferencial y acumulativa de la distribución de tamaño de partículas.	52
22 Ejemplo de una curva de flujo, donde se representa el esfuerzo en función de la velocidad de cizalla.	53
23 Ejemplo de una gráfica de retrodispersión.	54
24 Ejemplo de una curva de espesor absoluto ajustada al modelo sigmoideal.	55
25 Ejemplo de una curva de adhesividad por penetración y retirada.	57
26 Ejemplo de una gráfica de extrusión positiva.	58
27 Curva de viscosidad obtenida en los diferentes intervalos de velocidad de cizalla para la emulsión de goma xantana al 0.05%.	60
28 Curva de flujo de la emulsión base con diferentes concentraciones de goma xantana.	60

29	Curva de viscosidad de la emulsión base con diferentes concentraciones de goma xantana.	61
30	Distribución del tamaño de partícula con y sin el uso de ultrasonido, para las diferentes concentraciones de goma xantana.	63
31	Gráfica de transmisión-retrodispersión de la emulsión base con 0.05% de goma xantana.	65
32	Cinéticas de espesor absoluto de clarificado de las emulsiones base con diferentes concentraciones de goma xantana.	65
33	Curvas de adhesividad para crema batida con diferentes concentraciones de goma xantana.	69
34	Curva de retrodispersión en modo referencia de la emulsión sin goma xantana.	71
35	Cinética de espesor absoluto para las cremas batidas, a diferentes concentraciones de goma xantana.	71
36	Curva de flujo de emulsiones con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	73
37	Curva de viscosidad de emulsiones con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	73
38	Distribución del tamaño de partícula con y sin el uso de ultrasonido, para las diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	75
39	Cinéticas de espesor absoluto de la zona de clarificado de las emulsiones con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	77
40	Curvas de adhesividad de las cremas batidas con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	81
41	Cinética de espesor absoluto de clarificado para las cremas batidas, a diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	82
42	Curva de flujo de emulsiones con diferentes concentraciones de leche descremada.	83
43	Curva de viscosidad de emulsiones con diferentes concentraciones de leche descremada.	84
44	Distribución del tamaño de partícula con y sin el uso de ultrasonido, para las diferentes concentraciones de leche descremada.	86
45	Cinéticas de espesor absoluto de la zona de clarificado para emulsiones base con diferentes concentraciones de leche descremada.	87
46	Curvas de adhesividad de las cremas batidas con diferentes concentraciones de leche descremada.	90
47	Cinética de espesor absoluto de clarificado para las cremas batidas, a diferentes concentraciones de leche descremada.	91
48	Curva de flujo de emulsiones para las diferentes concentraciones de grasa vegetal.	92
49	Curva de viscosidad para la emulsión con diferentes concentraciones de	93

grasa vegetal.	
50 Distribución del tamaño de partícula con y sin el uso de ultrasonido, para las diferentes concentraciones de grasa vegetal.	95
51 Cinéticas de espesor absoluto de clarificado de las emulsiones con diferentes concentraciones de grasa vegetal.	96
52 Curvas de adhesividad de las cremas batidas con diferentes concentraciones de grasa vegetal.	99
53 Cinética de espesor absoluto de clarificado para las cremas batidas, a diferentes concentraciones de grasa vegetal.	100
54 Curva de flujo de emulsiones con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.	102
55 Curva de viscosidad para la emulsión con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.	102
56 Distribución del tamaño de partícula con y sin el uso de ultrasonido, para las diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.	104
57 Cinética de espesor absoluto de clarificado de la emulsión a 5% de concentrado de suero de leche.	106
58 Gráfica de transmisión en modo de referencia para la concentración de 3% de concentrado de suero de leche.	106
59 Gráfica de transmisión en modo de referencia para la concentración de 7% concentrado de suero de leche.	107
60 Curvas de adhesividad para la crema batida con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.	109
61 Cinética de espesor absoluto de clarificado de las cremas batidas a diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.	110
62 Comparación de gráficas de extrusión para crema batida.	112
63 Comparación de las cinéticas de clarificado de todas las emulsiones base.	116
64 Comparación de las cinéticas de clarificado de todas las cremas batidas.	117
65 Esquema del modo de operación del Turbiscan.	119
66 Celda de medición.	

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Pág.
1 Enfoque de estudios realizados sobre cremas batidas y emulsiones.	37
2 Tabla diseño experimental ANOVA de una sola vía.	48
3 Materiales.	49
4 Parámetros reológicos de las emulsiones base con diferentes concentraciones de goma xantana.	61
5 Viscosidades a dos velocidades de cizalla de las emulsiones base a diferentes concentraciones de goma xantana.	62
6 Tamaño de partícula de la emulsión base con diferentes concentraciones de goma xantana.	64
7 Ajuste al modelo sigmoidal de las emulsiones base con diferentes concentraciones de goma xantana.	66
8 Tiempo de batido y rendimiento de la crema batida con diferentes concentraciones de goma xantana.	67
9 Densidad de la crema batida con diferentes concentraciones de goma xantana.	67
10 Diámetro promedio de burbuja para la crema batida con diferentes concentraciones de goma xantana.	68
11 Parámetros obtenidos en la prueba de adhesividad para crema batida con diferentes concentraciones de goma xantana.	70
12 Parámetros del modelo sigmoidal para el drenado de la crema batida con diferentes concentraciones de goma xantana.	72
13 Parámetros reológicos de las emulsiones base con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	74
14 Viscosidades a dos velocidades de cizalla de las emulsiones base a diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	74
15 Tamaño de partícula de las emulsiones base con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	76
16 Parámetros del modelo sigmoidal de las emulsiones base con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	78
17 Tiempo de batido y rendimiento de la crema batida con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	79
18 Densidad de la crema batida con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	79
19 Diámetro promedio de burbuja para la crema batida con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	80
20 Parámetros obtenidos en la prueba de adhesividad para crema batida con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	81

21	Parámetros del modelo sigmooidal para la clarificación de la crema batida con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.	83
22	Parámetros reológicos de la emulsión base con diferentes concentraciones de leche descremada.	84
23	Viscosidades a dos velocidades de cizalla de las emulsiones base a diferentes concentraciones de leche descremada.	85
24	Tamaño de partícula de la emulsión base con diferentes concentraciones de leche descremada.	86
25	Parámetros del modelo sigmooidal de la emulsión base con diferentes concentraciones de leche descremada.	87
26	Tiempo de batido y rendimiento de la crema batida con diferentes concentraciones de leche descremada.	88
27	Densidad de la crema batida con diferentes concentraciones de leche descremada.	88
28	Diámetro promedio de burbuja para la crema batida con diferentes concentraciones de leche descremada.	89
29	Parámetros obtenidos en la prueba de adhesividad para crema batida con diferentes concentraciones de leche descremada.	90
30	Parámetros del modelo sigmooidal para el drenado de la crema batida con diferentes concentraciones de leche descremada.	91
31	Parámetros reológicos para las diferentes concentraciones de grasa vegetal.	93
32	Viscosidades a dos velocidades de cizalla de las emulsiones base a diferentes concentraciones de grasa vegetal.	94
33	Tamaño de partícula de las emulsiones base con diferentes concentraciones de grasa vegetal.	95
34	Parámetros del modelo sigmooidal de la zona de clarificado para emulsiones base con diferentes concentraciones de grasa vegetal.	96
35	Tiempo de batido y rendimiento de la crema batida con diferentes concentraciones de grasa vegetal.	97
36	Densidad de la crema batida con diferentes concentraciones de grasa vegetal.	98
37	Diámetro promedio de burbuja para la crema batida con diferentes concentraciones de grasa vegetal.	98
38	Parámetros obtenidos en la prueba de adhesividad para las cremas batidas con diferentes concentraciones de grasa vegetal.	100
39	Parámetros del modelo sigmooidal para el drenado de la crema batida con diferentes concentraciones de grasa vegetal.	101
40	Parámetros reológicos del modelo de la potencia de la emulsión base a diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.	103

41	Viscosidades a dos velocidades de cizalla de las emulsiones base a diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.	103
42	Tamaño de partícula de las emulsiones base con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.	105
43	Parámetros del modelo sigmoidal para el clarificado de la crema batida con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.	106
44	Tiempo de batido y rendimiento de la crema batida con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.	107
45	Densidad de la crema batida con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.	108
46	Diámetro promedio de burbuja para la crema batida con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.	108
47	Parámetros obtenidos en la prueba de adhesividad para las cremas batidas con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.	110
48	Parámetros del modelo sigmoidal de las cremas batidas a diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.	111
49	Parámetros de extrusión para las cremas batidas.	112
50	Comparación de los resultados más relevantes de la emulsión base.	114
51	Comparación de los resultados más relevantes de la crema batida.	115

RESUMEN

En este proyecto se estudió la influencia que tiene la concentración de los ingredientes en las propiedades físicas, texturales y en la estabilidad de cremas batidas, compuestas por leche descremada, grasa vegetal, almidón lipofílico, goma xantana y suero de leche, utilizando el almidón lipofílico como una alternativa al uso de los emulsificantes de bajo peso molecular. Las propiedades se evaluaron en cinco objetivos particulares, en cada uno se varió la concentración de uno de los ingredientes, cabe destacar que sólo en el quinto objetivo se utilizó el suero de leche; en el objetivo particular 1 se varió la goma xantana (0%, 0.05%, 0.1%), en el objetivo particular 2 el almidón lipofílico (6%, 8% y 12%), en el objetivo particular 3, la leche descremada (5% y 7.5%), en el objetivo particular 4, la grasa vegetal (20%, 25% y 30%) y finalmente en el objetivo particular 5 el suero de leche (3% , 5% y 7%). Se realizaron siete pruebas en cada objetivo, a la emulsión base se le hicieron pruebas para medir su estabilidad al clarificado (por transmisión-retrodispersión de luz, Turbiscan 2000, Formulaction), se midió el tamaño de partícula (por difracción de luz láser, Granulómetro Cilas 920, Cilas) y su comportamiento al flujo (viscosímetro de cilindros concéntricos MC 1, Paar Physica); a la crema batida se le midió el rendimiento (por diferencia de volumen), la densidad (relación masa/volumen), el tamaño de partícula (microscopía óptica, microscopio CX31, Olympus), textura (adhesividad y extrusión, texturómetro TA-XT2, Stable Micro Systems) y la estabilidad (por transmisión-retrodispersión de luz, Turbiscan 2000, Formulaction). Para el objetivo particular 1 la concentración con mejores características, es decir mayor estabilidad, consistencia y adhesividad entre otras, fue la de 0.05% de goma xantana, en el objetivo particular 2 fue la de 8% de almidón lipofílico, en el objetivo particular 3 fue la de 5% de leche descremada, en el objetivo particular 4 fue la de 30% de grasa vegetal, y finalmente en el objetivo particular 5 fue la de 7% suero de leche. Las diferentes concentraciones afectaron de manera notable las propiedades tanto de la emulsión base como de la crema batida, de tal manera que las mejores características de todos los objetivos, se obtuvieron con la concentración de 30% de grasa vegetal y con la de 7% de suero de leche.

INTRODUCCIÓN

Una emulsión consiste en dos líquidos inmiscibles y emulsificante, con uno de los líquidos disperso como pequeñas gotas esféricas en el otro; las emulsiones alimenticias pueden ser, productos finales (mayonesa, crema de consumo directo), ingredientes o bases para crear nuevas estructuras (base para helado, crema para batir), esta última es la de mayor interés ya que la crema batida es una emulsión aireada (Mc Clements, 2004; Dalgleish, 2006).

Durante la aireación de una emulsión como en las cremas lácteas o helado, se introducen pequeñas burbujas de aire, las cuales son estabilizadas por una capa de las gotas adsorbidas de la emulsión; con el fin de ser eficaces para proporcionar la estructura y la estabilidad de esta clase de espuma, las gotas deben contener una proporción significativa de grasa cristalizada. Macroscópicamente las emulsiones aireadas tienen una apariencia blanca opaca y una densidad relativa baja, debido a la alta incorporación de burbujas de gas en el sistema (Van Aken, 2001; Hotrum y col., 2004).

Aunque es necesario que la emulsión base sea estable durante el almacenamiento, la interfase debe ser débil para permitir la coalescencia parcial durante el batido, ésta es la función principal de los emulsificantes añadidos a la crema para batir, como emulsificantes de bajo peso molecular (EBPM). La desestabilización de la emulsión no puede ocurrir sin la presencia de los EBPM, ya que éstos son capaces de desplazar a las proteínas de la superficie de los glóbulos de grasa y disminuir la estabilidad de la emulsión (Euston y col., 2001; Vega, 2006).

El proceso de elaboración de la crema batida implica la desestabilización de una emulsión base por medio del batido en frío y la competencia por la interfase entre las proteínas lácteas y los emulsificantes de bajo peso molecular, lo que ocasiona la coalescencia parcial de glóbulos de grasa y la formación de una red de éstos, la cual soporta las burbujas de aire y proporciona la estabilidad del sistema. Una alternativa al empleo de emulsificantes de bajo peso molecular, son los almidones modificados de carácter lipofílico, como el almidón octenil succinato.

El almidón octenil succinato (almidón OSA), es un almidón lipofílico que muestra una fuerte actividad superficial debido a su naturaleza anfifílica y es soluble en agua fría. A

diferencia de los típicos surfactantes, el almidón OSA forma fuertes películas en la interfase aceite-agua proporcionando a las emulsiones resistencia a la aglomeración (Dokic y col., 2012).

Lo anterior ha sido demostrado por numerosos estudios en los que destacan los realizados por Dokic y col. en el año 2012, quienes estudiaron las características fisicoquímicas y de estabilidad de emulsiones estabilizadas con almidón OSA. Li y col. en el 2013, estudiaron la combinación de maltosa y almidón OSA en emulsiones con aceite de naranja; Sweedman y col. en el 2013, hicieron una revisión de las principales características del almidón reportadas hasta ese momento, por mencionar algunos.

La grasa láctea en cremas batidas puede ser sustituida con grasa vegetal, esto se hace para disminuir costos. A estas cremas se les denomina cremas no lácteas, lo que indica que la grasa de la leche ha sido reemplazada con grasa vegetal, éstas se han desarrollado para ser más eficaces en la estructura de la espuma a concentraciones más bajas de grasa que las hechas con grasa láctea (Kim y col., 2013).

Las proteínas lácteas también, juegan un papel importante en la estructura de las cremas batidas, ya que éstas interactúan con la grasa de la emulsión base y el aire, que es incorporado en la mezcla. Las proteínas parcialmente desnaturalizadas (leche descremada y suero de leche) son más hidrófobas. La hidrofobicidad expuesta de las proteínas acelera la adsorción en la interfase aire-agua lo que proporciona estabilidad al sistema (Borcherding y col., 2008; Eisner y col., 2005).

Por otro lado, la adición de estabilizantes aumenta la viscosidad de la fase continua, disminuye la desestabilización por clarificado de la emulsión aireada e interaccionan con las proteínas. Algunas gomas (algarrobo, guar, xantana) pueden ser usadas con este propósito, inclusive a concentraciones bajas (Vega, 2006; Dutta y col., 2004).

En este trabajo se incursionará en el estudio de la influencia de la concentración de grasa vegetal de palma, almidón lipofílico, goma xantana, leche descremada en polvo y concentrado de suero de leche, sobre el rendimiento, textura y estabilidad de la crema batida. Su influencia se evaluará con diseños experimentales ANOVA de una sola vía y la prueba de rangos múltiples de Tukey.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 Emulsión

Una emulsión consiste en dos líquidos inmiscibles (usualmente agua y aceite), con uno de los líquidos disperso como pequeñas gotas esféricas en el otro. En la mayoría de los alimentos, los diámetros de los glóbulos usualmente están entre 0.1 y 100 μm , como se muestra en la Figura 1 (McClements, 2004).

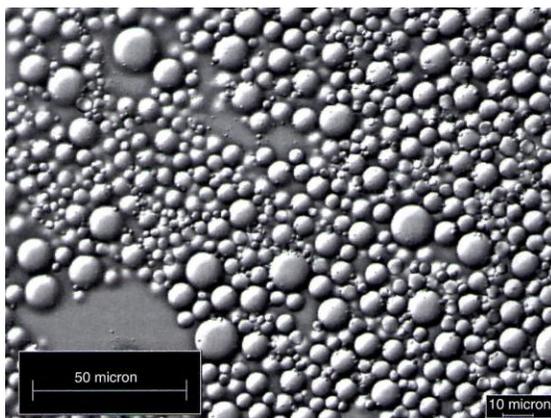


Figura 1. Ejemplo de una emulsión aceite en agua, donde la fase discontinua está representada por los glóbulos de aceite (McClements, 2004).

Las emulsiones pueden ser convenientemente clasificadas de acuerdo a la distribución espacial relativa del aceite y la fase acuosa (Figura 2) como sigue.

- *Emulsiones agua en aceite (W/O).* Formadas por una fase dispersa de agua, o líquidos miscibles en ella y una fase continua grasa (mantequilla, margarina, algunas mayonesas, entre otros).
- *Emulsiones aceite en agua (O/W).* Formadas por una fase dispersa grasa y la fase continua acuosa (leche, nata líquida, entre otros).

Dalgleish (2006) afirma que el comportamiento de las emulsiones aceite-en-agua en alimentos es definido por tres partes del sistema:

- *Grasa o aceite.* Los cuales están en el interior de las gotas de la emulsión. La cual puede estar parcial o totalmente cristalizada dependiendo de la temperatura.
- *Material interfacial.* Se encuentra entre la parte lipídica y la fase acuosa, puede estar compuesto de proteínas y/o emulsificantes de bajo peso molecular como monoglicéridos, ésteres o fosfolípidos, o mezclas de estos componentes.
- *Fase acuosa.* Puede contener iones, que pueden desestabilizar la emulsión, o macromoléculas como polisacáridos, los cuales aumentan la viscosidad de la fase continua, favoreciendo la estabilidad.

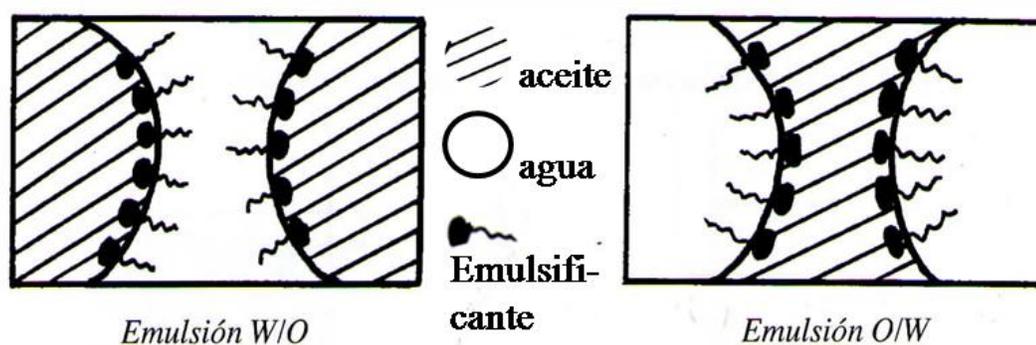


Figura 2. Tipos de emulsiones (Cubero y col., 2002).

Para llegar a formar una emulsión, se ha de aportar energía al sistema, de manera que se aumente la superficie de contacto entre las dos fases y se pueda formar la zona de interfase donde se sitúe el emulsificante (Cubero y col., 2002).

La apariencia característica y la reología de las emulsiones alimenticias, es en gran parte resultado de la inmiscibilidad del agua y el aceite, esto lleva a un sistema donde los glóbulos de aceite están dispersos en un sistema de agua. Las emulsiones alimenticias usualmente se ven turbias u opacas, porque la luz que pasa a través de ellas es dispersada por estos glóbulos. La textura característica de algunas emulsiones es debida a la habilidad de la fase de aceite para cristalizar (McClements, 2004).

1.1.1 Formación de emulsiones

Al proceso de convertir dos líquidos inmiscibles en una emulsión (homogeneización primaria), o de reducir el tamaño de los glóbulos de una emulsión preexistente (homogeneización secundaria), se le conoce como homogeneización (Figura 3). En la

industria alimentaria, este proceso es llevado a cabo usando dispositivos mecánicos, conocidos como homogeneizadores, los cuales someten a los líquidos a una intensa agitación mecánica, la cuál debe ser lo suficientemente fuerte para vencer la tensión interfacial y así permitir la dispersión de uno de los fluidos en el otro (McClements, 2004).

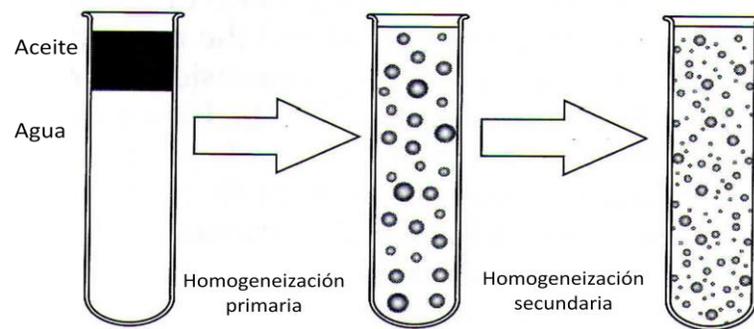


Figura 3. Etapas de la homogeneización de una emulsión (McClements, 2004).

Ejemplos de homogeneizadores son: los agitadores de alta velocidad, los homogeneizadores de válvulas de alta presión y los molinos coloidales. La formación de una emulsión puede involucrar un solo paso o un número consecutivo de pasos, dependiendo de la naturaleza del material inicial y del método usado para crearla (McClements, 2004). Sin embargo, hay dos pasos críticos en el proceso de emulsificación, el primero es una ruptura del glóbulo y el segundo es una coalescencia, después de cierto tiempo de emulsificación existe un equilibrio entre ellas (Dokic y col., 2012).

El mecanismo primario de estabilización en emulsiones aceite-agua ocurre en la fase continua o en la superficie de los glóbulos dependiendo de la naturaleza química del componente que está implicado en la estabilización del sistema. Hay dos tipos de ingredientes en las formulaciones de las emulsiones: el agente emulsificante y el estabilizante (Dokic y col., 2012).

Antes de convertir las fases separadas de agua y aceite en una emulsión es a menudo necesario dispersar los múltiples ingredientes funcionales en la fase en la cual sean más solubles. Ciertos tipos de ingredientes en polvo son a menudo mezclados juntos, antes de agregarlos al medio dispersante.

1.1.2 Estructura y propiedades físicas de la grasa en una emulsión

Las grasas y los aceites son parte de un grupo de componentes conocidos como lípidos. Por definición, un lípido es un componente que únicamente es soluble en disolventes orgánicos, pero insoluble o parcialmente soluble en agua. Este tipo de componentes contienen un número grande de diferentes tipos de moléculas, incluyendo acilgliceroles, ácidos grasos y fosfolípidos. Las grasas y los aceites comestibles se extraen de una gran variedad de fuentes, que incluyen plantas, semillas, nueces, animales y peces.

Las grasas y los aceites influyen en las propiedades nutricionales, organolépticas y fisicoquímicas de las emulsiones alimenticias en una variedad de maneras. El sabor y el aroma de una emulsión se ven fuertemente influidos por el tipo y la concentración de los lípidos. Reducir el contenido lipídico de una emulsión puede tener una profunda influencia en su perfil de sabor, estabilidad y contenido nutricional (McClements, 2004).

Diversos aceites presentan diferente tensión en la interfase cuando se ponen en contacto con agua, porque tienen distintas estructuras moleculares o porque tienen diferentes cantidades de impurezas con actividad de superficie, tales como los ácidos grasos libres, los monoacilgliceridos o diacilgliceridos. Estos lípidos con actividad de superficie tienden a acumularse en la interfase aceite-agua y bajar la tensión interfacial, disminuyendo así la cantidad de energía requerida para romper una gota.

Muchas de las propiedades fisicoquímicas de las grasas y aceites comestibles tienen una importante influencia en la formación y estabilidad de las emulsiones. La estabilidad al cremado de las emulsiones depende de la diferencia de densidad entre el aceite y la fase acuosa, y por lo tanto los cambios en la densidad de la fase grasa pueden causar cambios en la estabilidad de la emulsión (McClements, 2004).

El tamaño mínimo de los glóbulos de grasa que puede ser producido por algunos homogeneizadores depende de la relación de la viscosidad de la fase dispersa a la de la fase continua. La viscosidad de los lípidos comestibles disminuye apreciablemente con la temperatura y la naturaleza precisa del perfil de viscosidad-temperatura depende del tipo y composición del lípido. Por lo tanto, la habilidad de producir una emulsión que contenga

glóbulos de grasa pequeños puede depender de la naturaleza del aceite usado, así como de las condiciones de homogeneización utilizadas en la preparación de la emulsión.

La tensión en una interfase aceite-agua también puede influir en el tamaño de los glóbulos de grasa producidos durante la homogeneización, la rotura de los glóbulos de grasa usualmente se vuelve más fácil a medida que la tensión interfacial disminuye. La tensión interfacial de la grasa depende de las moléculas dominantes de los lípidos presentes, así como de la presencia de cualquier componente de menor actividad superficial (McClements, 2004).

La polaridad de la grasa también puede influir en la partición de los componentes funcionales (como saborizantes, antioxidantes, conservadores o colorantes) entre el aceite y la fase acuosa, que pueden alterar las propiedades fisicoquímicas y sensoriales del sistema. En general, las propiedades fisicoquímicas de muchas grasas y aceites comestibles son similares y por consiguiente la elección del tipo de aceite puede no tener una gran influencia en la mayoría de las propiedades de una emulsión. Sin embargo, algunos tipos de grasa tienen significativas diferencias en las propiedades que la mayoría de las otras grasas, que pueden tener una influencia apreciable en las características de las emulsiones (McClements, 2004).

1.1.3 Factores que afectan la formación de una emulsión

McClements (2004) estableció que el tamaño de los glóbulos producidos durante la homogeneización es importante porque determina la estabilidad, la apariencia, la textura y el sabor del producto final. Para crear un producto con propiedades específicas, es necesario asegurar que la mayoría de los glóbulos caigan dentro de algún intervalo de tamaño preestablecido. Los siguientes son factores que influyen en el tamaño de los glóbulos.

- *Tipo y concentración de emulsificante.* Para una concentración fija de aceite, agua y emulsificante hay una máxima área interfacial que puede ser cubierta por el emulsificante. Conforme la homogeneización procede, el tamaño de los glóbulos disminuye y el área interfacial aumenta. Una vez que los glóbulos llegan a cierto tamaño, puede haber insuficiente emulsificante presente para cubrir completamente su superficie y por eso tienden a coalescer con sus vecinas. El emulsificante también

influye en el tamaño de glóbulo reduciendo la tensión superficial entre el aceite y la fase acuosa, facilitando la disminución del tamaño de los glóbulos de grasa.

- *Aporte de energía.* El tamaño del glóbulo en una emulsión puede ser disminuido mediante el aumento de la intensidad o la duración de la energía disruptiva suministrada durante la homogeneización. El intervalo de aporte de energía que se puede lograr por el dispositivo de homogeneización, y la efectividad de esta energía al perturbar los glóbulos, depende del tipo de homogeneizador usado.
- *Propiedades de los componentes de las fases.* La composición y las propiedades fisicoquímicas de la fase acuosa y de aceite influyen en el tamaño de los glóbulos producidas durante la homogeneización. Variaciones en el tipo de aceite o la fase acuosa alterarán la viscosidad, la cual determina el tamaño mínimo que puede ser producido bajo condiciones de estado estacionario. La fase acuosa de una emulsión puede contener una variedad de componentes que incluyen minerales, ácidos, bases, biopolímeros, azúcares, alcoholes y burbujas de gas. Muchos de estos componentes alterarán el tamaño de los glóbulos producidos durante la homogeneización, debido a su influencia en la reología, la tensión interfacial, la coalescencia o la cinética de adsorción.
- *Temperatura.* La viscosidad de ambas fases (aceite y agua) es dependiente de la temperatura y por lo tanto, el tamaño mínimo de glóbulo que puede ser producido se ve afectado por la viscosidad. Usualmente la viscosidad de la fase continua disminuye a una mayor velocidad cuando se aumenta la temperatura. El aumento de temperatura en una emulsión usualmente causa una leve reducción en la tensión interfacial entre las fases de aceite y agua que se esperaría facilitara la producción de glóbulos de menor tamaño.

1.1.4 Emulsificantes

Los emulsificantes son aquellas sustancias de superficie activa que hacen posible la formación y/o mantenimiento de una dispersión uniforme entre dos o más sustancias inmiscibles y protegen los glóbulos de la emulsión, a través de la reducción de la tensión superficial de la interfase aceite-agua y la formación de una película en la superficie del glóbulo de grasa. Las sustancias con capacidad emulsionante presentan una estructura

bipolar, donde se distingue una parte hidrófila (afín al agua) formada por grupos disociables o grupos hidroxilo y otra lipófila (afín a aceites y grasas) de cadena alquílica (Cubero y col., 2002; Dokic y col., 2012).

Hay diferentes maneras para estabilizar una emulsión, la cual dependerá del tipo de emulsificante usado y de su composición, la Figura 4 expone las diferentes orientaciones y conformaciones que se pueden dar en la interfase, dependiendo del tipo de emulsificante. El carácter bipolar es lo que se valora en la industria alimentaria, ya que también pueden ser creadores y estabilizadores de espumas, modificadores de textura y también controlan la forma de cristalización de las grasas.

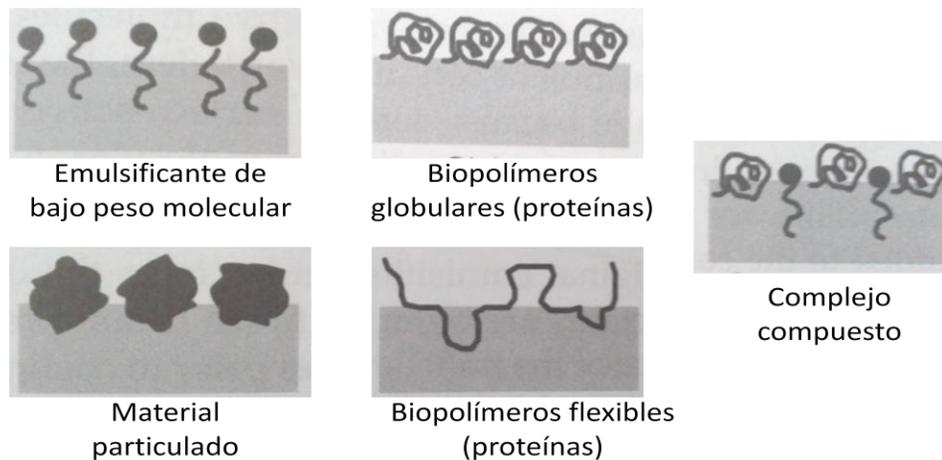


Figura 4. Orientación y conformación en la interfase de las moléculas con actividad de superficie (McClements, 2004).

Los emulsificantes más comúnmente usados en la industria alimentaria son pequeñas moléculas surfactantes, biopolímeros anfifílicos y partículas con actividad de superficie (Figura 4). Estos emulsificantes varían extensamente en su habilidad para formar y estabilizar emulsiones, dependiendo de sus características moleculares y fisicoquímicas (McClements, 2004).

La estabilidad y la textura de las emulsiones alimenticias que contienen mezclas de biopolímeros, no sólo dependen de las propiedades funcionales de los ingredientes individuales, sino también de la naturaleza y la fuerza de las interacciones proteína-

polisacárido. En algunos casos, las interacciones entre la proteína y el polisacárido pueden mejorar sinérgicamente la estabilidad de la emulsión (Leal-Calderon y col., 2007).

Los emulsificantes empleados en alimentos se pueden dividir en dos grupos: emulsificantes de bajo peso molecular y emulsificantes de alto peso molecular (proteínas, almidones, entre otros).

1.1.4.1 Emulsificantes de bajo peso molecular

Los emulsificantes de bajo peso molecular (EBPM) son importantes ingredientes funcionales en muchas emulsiones lácteas. En productos lácteos, los emulsificantes aparentemente tienen un efecto en dos importantes mecanismos, es decir, el efecto que tienen sobre las moléculas por medio de proteínas adsorbidas y el efecto que tienen sobre la cristalización de la grasa. En productos tales como la crema batida y el helado la formación de un producto estable es solo lograda mediante la desestabilización de la emulsión base, lo que significa que los glóbulos de grasa están disponibles para absorber y estabilizar las burbujas de aire durante el proceso de batido (Euston y col., 2001). La estructura de estas moléculas puede observarse en la Figura 4, su orientación dependerá del tipo de emulsión en la que se encuentre.

Ejemplos de EBPM pueden ser fosfolípidos extraídos de las lecitinas de soya y del huevo, monoglicéridos obtenidos a partir de grasas y aceites mediante interesterificación con glicerol, ésteres de sacarosa, ésteres de sorbitano, polisorbatos, entre otros. Se utilizan también ésteres de monoglicéridos con ácidos orgánicos del tipo: acético, láctico, diacetiltartárico y cítrico, con lo que se logran emulsionantes con propiedades anfifílicas diferentes a los monoglicéridos (Muñoz y col., 2007).

Los EBPM juegan un papel determinante en lo que se conoce como efecto Gibbs-Marangoni. Cuando una película gruesa de tensoactivo se forma entre dos glóbulos y éstos se acercan, a menudo se aplastan, la película está expuesta a un esfuerzo de estiramiento frecuentemente complejo, en el que el área superficial líquido-líquido aumenta rápidamente. La concentración de EBPM adsorbido tiende a disminuir en la zona estirada donde la película es más delgada que en las zonas vecinas, en consecuencia, la tensión superficial aumenta.

Como lo indica la Figura 5, se tiene una diferencia de tensión entre la zona estirada de la película (tensión más elevada, menor grosor) y las zonas adyacentes (no estirada, tensión más baja). Esto produce un fenómeno denominado inestabilidad de Marangoni. En el caso de las películas estiradas entre la superficie libre y una burbuja, o entre dos burbujas, el movimiento superficial se produce desde la zona vecina hasta la zona estirada; si la película es suficientemente delgada, este movimiento superficial se lleva a cabo desde el líquido hasta la parte delgada de la película, lo que restaura su espesor original o bien impide que el estiramiento prosiga. Se asiste entonces a un mecanismo (denominado Gibbs-Marangoni) que confiere una cierta elasticidad a una película estirada entre dos glóbulos o dos burbujas (Salager, y col., 1998).

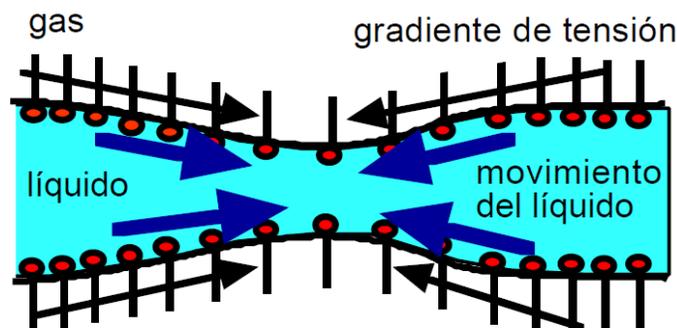


Figura 5. Efecto Gibbs-Marangoni (Salager, y col., 1998).

1.1.4.2 Emulsificantes de alto peso molecular

1.1.4.2.1 Proteínas

Son ampliamente usadas como emulsificantes en la industria alimentaria. De manera similar a los tensoactivos convencionales, las proteínas facilitan la rotura de los glóbulos de aceite durante la emulsificación (mediante la reducción de la tensión interfacial aceite-agua) y estabilizan los glóbulos contra la coalescencia durante la homogeneización, así como en el posterior almacenamiento de las emulsiones formadas. La eficiencia de los emulsificantes proteínicos depende en gran medida de la densidad y la estructura de las capas de adsorción de proteínas en la superficie del glóbulo.

En general, el proceso de adsorción de moléculas de proteína se sabe que constará de al menos dos etapas: (1) el transporte y la fijación de las moléculas a la interfase; (2) la

reorganización estructural de las moléculas adsorbidas con posible despliegue parcial y la formación de enlaces intermoleculares. La escala de tiempo de la segunda etapa podría ser más bien lenta (desde segundos a meses), lo que puede conducir a la evolución muy compleja de las capas adsorbidas de proteínas y las respectivas propiedades de las emulsiones (por ejemplo, el tiempo de conservación de almacenamiento). La cantidad de proteína adsorbida, la cinética de la adsorción, y la estructura de las capas formadas depende de muchos factores, tales como la estructura de la proteína, la concentración de proteína y electrolito, el pH, el pre-calentamiento de las dispersiones de proteína, el tipo de fase apolar (Tcholakova y col., 2006).

La interfase de una emulsión puede exhibir propiedades viscosas, elásticas y viscoelásticas. La habilidad de una emulsión de resistir a la coalescencia depende de las propiedades de la interfase. Una película interfacial altamente viscosa y rígida retardará el ritmo de clarificado de la película y la resistencia a la ruptura promoviendo así la estabilidad. Por lo tanto, controlando la reología interfacial, se puede controlar el clarificado del líquido atrapado entre los glóbulos coalescidos, lo cual también puede afectar el desplazamiento de los cristales fuera de la interfase durante la coalescencia de las gotas. Las proteínas estabilizan las emulsiones adsorbiéndose fuertemente en la interfase líquido/líquido, formando capas viscoelásticas adsorbidas y que conducen a una red de proteínas con alta viscosidad, mediante interacciones intermoleculares no covalentes (Sajedi y col., 2013; Rosseau, 2000).

Las proteínas lácteas son ampliamente empleadas como emulsificantes, ya sea como leche descremada y como proteínas separadas en caseinatos ó en concentrados de suero. Toman su conformación y su orientación de acuerdo al tipo de proteína, que pueden ser globulares o flexibles (Figura 4).

Leche en polvo descremada

Porción que queda de la leche descremada, después de haberle quitado cerca del 95% de su contenido de agua. Se suele enriquecer con vitaminas A y D. Se le da un tratamiento para facilitar su dispersión en agua fría (Revilla, 1982). De acuerdo con el Codex stan 288-1976 la leche descremada debe contener un máximo de 1.5% de grasa de leche, para considerarse como tal.

De acuerdo con Gil (2010) la leche en polvo se elabora mediante los procesos de pulverización y de molturación de la leche totalmente deshidratada y secada. Antes de su utilización debe mezclarse el polvo con agua, en una proporción de 1:8. Actúa como refuerzo y como emulsificante en cremas, salsas, sopas, entre otros.

La leche tiene dos importantes clases de proteínas lácteas: caseínas y proteínas del suero. Las caseínas pueden ser fraccionadas en cuatro distintas proteínas, α_{s1} -, α_{s2} -, β - y κ -caseínas, las cuales son todas fosfoproteínas. La característica más importante de estas proteínas es que su estructura primaria es anfifílica, lo que determina su habilidad para adsorberse en la interfase aceite-agua y así estabilizar emulsiones. Las propiedades funcionales de las proteínas lácteas incluyen fijación de agua, emulsificantes, espumantes, gelificantes y propiedades nutricionales (Singh, 2011).

Suero de leche

Las proteínas del suero son obtenidas del suero, un co-producto de la elaboración del queso y de la producción de caseína en la industria láctea; desempeña importantes roles funcionales en alimentos, así como en sistemas biológicos. Su potencial como base de formulaciones en emulsiones se deriva de sus excelentes propiedades emulsificantes y espumantes. Son mayormente utilizadas en forma de concentrados de proteína de suero (WPCs por sus siglas en inglés), los cuales son producidos usando un proceso de separación por membranas como la ultrafiltración (Dybowska, 2011).

Las proteínas del suero de leche son conocidas por alterar su comportamiento de adsorción en la interfase respondiendo tanto a las diferentes condiciones ambientales como a la presencia de diferentes aditivos alimentarios como lípidos, azúcares, electrolitos, polisacáridos, entre otros (Pérez y col., 2010).

En años recientes, las proteínas del suero han sido usadas en muchas formulaciones alimentarias. El uso de estas proteínas no sólo se debe a sus únicas propiedades nutricionales, sino también de sus propiedades funcionales. Las principales proteínas del suero, β -lactoglobulina y α -lactoalbúmina, son cerca del 70% del total de las proteínas del suero responsables de muchas de sus propiedades funcionales. Estas proteínas son globulares y anfifílicas, pueden adsorberse en las interfaces agua-aceite o aceite agua

formando una monocapa de proteínas globulares estrechamente empaquetadas en la interface (Figura 4), para formar emulsiones físicamente estables. En este caso, las proteínas del suero pueden estabilizar emulsiones y espumas (Donz y col., 2014; Sajedi y col., 2013).

1.1.4.3 Interacción proteínas-emulsificantes de bajo peso molecular

La existencia de un efecto sinérgico positivo en la estabilización de emulsiones aceite en agua, como resultado de la adición de un EBPM a las proteínas, ha sido ampliamente contrastada en diferentes tipos de sistemas. Un efecto positivo se ha atribuido a la existencia de diversos tipos de interacciones entre ambos tipos de emulsificantes, que modifican las propiedades viscoelásticas de las emulsiones y conducen a un aumento de su estabilidad. Sin embargo, el efecto contrario ha sido detectado en determinadas emulsiones estabilizadas por mezclas proteína/tensoactivo, dependiendo de la naturaleza del tensoactivo empleado y de su proporción en la mezcla emulsionante total.

El comportamiento reológico complejo de las emulsiones puede relacionarse con el desplazamiento que sufre la proteína situada en la interfase, que es sustituida parcialmente por las moléculas de tensoactivo de bajo peso molecular, lo que produce un descenso en la viscoelasticidad de la capa interfacial. La pérdida de viscoelasticidad interfacial cuando se usan ambos tipos de emulsionantes es, además, debida a que las moléculas de proteína poseen bajas velocidades de difusión en comparación con la de EBPM, tanto más cuanto mayor es la viscosidad del medio continuo (Raymundo y col., 2001).

1.1.4.4 Almidones lipofílicos

1.1.4.4.1 Almidón

El almidón es un homopolímero ramificado de glucosa, con enlaces lineales α -(1→4) y enlaces ramificados α -(1→6). El almidón consta de dos tipos de polímeros, cada uno de los cuales tiene una amplia distribución de tamaños y pesos moleculares (Figura 6): la amilosa, que es de peso molecular moderado ($\sim 10^6$) y con unas pocas cadenas largas ramificadas, y la amilopectina, cuyo peso molecular es de aproximadamente dos órdenes de magnitud mayor y cuyas ramas son mucho más cortas (Sweedman y col., 2013).

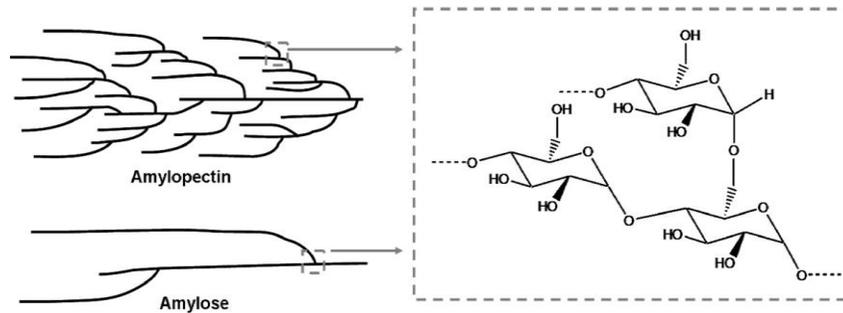


Figura 6. Esquema de la estructura y la composición química de amilosa y amilopectina (Sweedman y col., 2013).

Entre sus aplicaciones se incluye: adhesivo, ligante, enturbiante, formador de películas, estabilizante de espumas, agente anti-envejecimiento de pan, gelificante, glaseante, humectante, estabilizante, texturizante y espesante. Se presenta como complejas partículas discretas (gránulos), estos son relativamente densos e insolubles, y se hidratan muy mal en agua fría (Fennema, 2002).

El almidón es la molécula de mayor almacenamiento de energía en las plantas y está ampliamente disponible como un recurso para la industria. Proporciona el 70-80% de las calorías consumidas por los humanos de todo el mundo. Almidones comerciales se obtienen de las semillas de cereales, particularmente de maíz, maíz céreo, maíz rico en amilosa, trigo, arroz y algunas raíces y tubérculos (Fennema, 2002). En el caso de los gránulos del almidón de maíz, estos son poligonales y redondeados (Figura 7), el tamaño promedio es de 15 μm en un intervalo entre 5-25 μm (Graham, 1977).

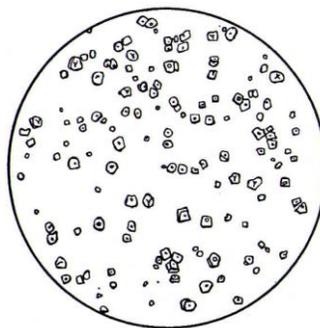


Figura 7. Almidón de maíz. Las zonas amorfas representan los gránulos del almidón (Graham, 1977).

Los almidones nativos son insolubles en agua fría y solamente sometidos a calentamiento interactúan con el agua a través de sus múltiples grupos OH, formando puentes de hidrógeno lo que causa un notable incremento de la viscosidad de los sistemas resultantes. Con la finalidad de mejorar el desempeño y facilitar el empleo de las pastas de almidones nativos, se les realizan modificaciones químicas.

Almidones modificados

La modificación se lleva a cabo de manera que las pastas resultantes puedan resistir las condiciones de calor, fuerzas y ácidos asociados con las condiciones de procesado de alimentos y para introducir funciones específicas. Los tipos de modificación llevados a cabo, son el entrecruzamiento de cadenas de polímero, la derivatización sin entrecruzamiento, la despolimerización y la pregelatinización. El almidón, como todos los carbohidratos, puede sufrir reacciones en sus diversos grupos hidroxilo por lo que las modificaciones generalmente son hechas tratando el almidón con agentes que introducen un sustituyente químico, vía reacción con grupos de hidroxilo en la molécula de almidón (Dokic, y col., 2012; Fennema, 2002).

1.1.4.4.2 Almidón lipofílico (almidón octenil succinato)

Los almidones nativos generalmente tienen una solubilidad limitada en agua a temperatura ambiente y son limitados en sus aplicaciones industriales. La modificación para provocar solubilidad puede suponer 1) cambios estructurales que hidrolicen el almidón en moléculas más pequeñas y/o 2) la adición de grupos sustituidos químicamente (Figura 8), tales como acetato o anhídrido octenil succínico (AOS) (Sweedman y col., 2013).

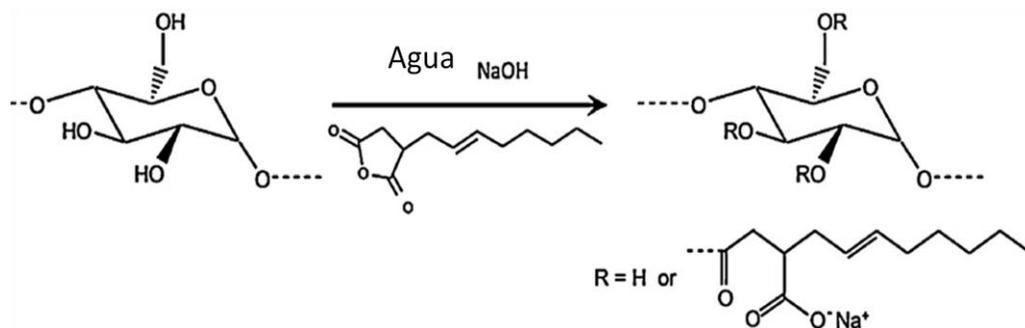


Figura 8. Estructura del almidón modificado con anhídrido octenil succínico (AOS) (Sweedman y col. 2013).

Cuando se modifica con AOS, el almidón normalmente hidrofílico gana un elemento hidrófobo en forma de grupos octenil, resultando en moléculas completas con características anfífilas. Los polímeros anfífilos tienen una gran variedad de aplicaciones, particularmente emulsificantes, encapsulantes, formadores de películas y coberturas (Sweedman y col., 2013).

En la elaboración de almidón octenil succinato (almidón OSA), las condiciones ligeramente básicas ayudan a reducir los enlaces de hidrógeno entre las cadenas de almidón por la formación de grupos funcionales alcóxido con los grupos OH, que por lo tanto favorece el hinchamiento de los gránulos de almidón y la difusión de las moléculas de AOS dentro de estos. Después de la modificación con AOS, se obtienen películas de almidón de maíz, con una disminución de la sensibilidad a la humedad y el aumento del carácter hidrofóbico de la superficie. El resto hidrófilo puede ser iónico, no iónico o ambos (Sweedman y col., 2013).

Una ventaja especial es que los almidones OSA son casi incoloros y sin sabor en la disolución. El almidón OSA es soluble en agua fría, es casi incoloro, sin sabor y mantiene baja viscosidad relativa para altas concentraciones en disolución, actúa como emulsificante y estabilizante. Debido a su naturaleza anfífilica, el almidón OSA muestra una fuerte actividad superficial. Su estructura macromolecular proporciona la habilidad de modificar la viscosidad acuosa y de estabilizar emulsiones aceite en agua. Las cadenas laterales cortas del octenil succinato llevan las moléculas del almidón OSA a la interfase aceite-agua, las largas cadenas de amilopectina protegen las gotas contra la floculación, por el mecanismo de estabilización estérica. A diferencia de los típicos emulsificantes de bajo peso molecular, el almidón OSA forma fuertes películas en la interfase aceite-agua proporcionando a las emulsiones resistencia a la aglomeración (Dokic y col., 2012; Sweedman, y col., 2013).

La estabilización puede ser totalmente electrostática, completamente estérica, o ambas. Los almidones OSA pueden funcionar como estabilizadores electrostéricos, aunque debido al tamaño de las moléculas en relación con el número de grupos cargados, su función es principalmente estérica, lo que hace que sus capacidades estabilizadoras sean esencialmente independientes del pH, la fuerza iónica del medio y a la temperatura (Sweedman y col., 2013).

1.1.5 Estabilizantes de emulsiones

Los estabilizantes son normalmente polisacáridos, su papel principal es el de inhibir la formación de cremado inducido por la gravedad y la separación de fases durante el almacenamiento a largo plazo de reposo. El principal efecto de los polisacáridos está basado en el control de la reología de la fase continua acuosa localizada en los espacios entre los glóbulos dispersados. Esto es ciertamente una explicación realista a bajas concentraciones de aceite, en donde los glóbulos dispersos bien se pueden inmovilizar por separado en una red de polisacárido y la fuerza de flotación que actúa sobre cada glóbulo es insuficiente para superar la tensión de fluencia del gel circundante (Leal-Calderon y col., 2007). Entre los estabilizantes de emulsiones más empleados se encuentra la goma xantana.

1.1.5.1 Gomas

Se utiliza el término goma para referirse a polisacáridos o sus derivados, obtenidos de plantas o de microorganismos, que al dispersarse en el agua fría o caliente, producen disoluciones o mezclas viscosas. Las gomas pueden ser entendidas como polisacáridos de cadena larga, que pueden ser poco, mucho o nada ramificados, pero que deben interactuar con el agua.

Una goma puede ser definida en sentido amplio, como cualquier polisacárido soluble en agua, que puede ser extraído a partir de vegetales terrestres o marinos, o de microorganismos, que poseen la capacidad, en solución, de incrementar la viscosidad y/ o de formar geles. Gomas vegetales de uso generalizado son las galactomanas de las semillas de guar y locuste (*Ceratonia siliqua*), los exudados como la goma arábica y el tragacanto, y las de las algas como las carrageninas y los alginatos (Pasquel, 2010).

Las gomas realizan al menos tres funciones en el procesamiento de los alimentos: espesantes, estabilizantes y gelificantes. Además, algunas también son agentes emulsificantes, formadoras de cuerpo, agentes de suspensión y aumentan la capacidad para la dispersión de gases en sólidos o líquidos. En las mismas concentraciones, las gomas con cadenas relativamente lineales, como la goma tragacanto, forman disoluciones más viscosas que las gomas de forma esférica como la goma arábica por ejemplo; y, generalmente, son

utilizadas en un intervalo de concentraciones entre 0.25 a 0.50% que muestra su gran habilidad para producir viscosidad y formar geles (Pasquel, 2010).

1.1.5.2 Goma xantana

El microorganismo *Xanthomonas campestris*, produce un polisacárido denominado xantano o goma xantana, el cual se obtiene de una polimerización por fermentación de la dextrosa. La goma xantana está formada por una cadena a modo de columna vertebral (Figura 9). Las cadenas laterales de trisacárido interaccionan por medio de fuerzas de unión secundarias con la cadena principal, lo que da lugar a que la molécula sea más bien rígida (Cubero y col., 2002).

La estructura del polímero está conformada por una cadena central de unidades de (1→4) β-D-glucopiranosil, idénticos a los de la celulosa. En la posición O-3 se agrega una cadena de trisacáridos que contiene una unidad de D-glucuronosil entre dos unidades de D-manosil, esto para alternar unidades de D-glucosil. La unidad terminal β-D-manopiranosil está glicosídicamente enlazada en la posición O-4 a la unidad del ácido glucopiranosilurónico, el cual a su vez está glicosídicamente enlazado a la posición O-2 de la unidad α-D-manopiranosil (Sharma, 2006).

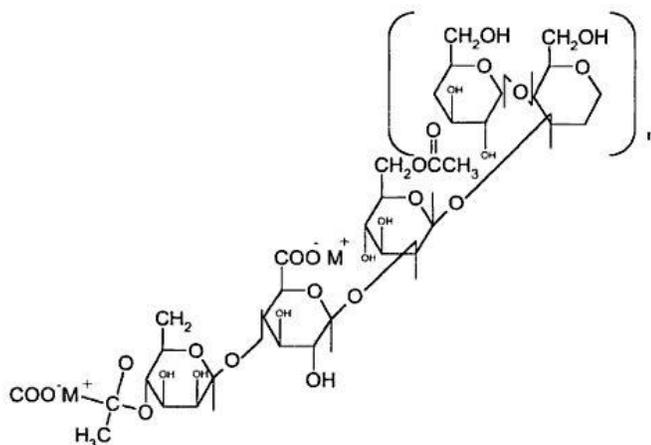


Figura 9. Estructura de la goma xantana (Sharma, 2006).

Las ramificaciones de la molécula de xantana y las características aniónicas debidas a los radicales ácido favorecen la separación de las cadenas y su hidratación, consiguiendo la solubilización total de la macromolécula (Cubero y col., 2002).

La goma xantana es de un color blanco a crema, es soluble en agua fría o caliente; produce alta viscosidad a bajas concentraciones; ausencia de cambios discernibles en la viscosidad de sus soluciones en el intervalo de temperaturas de 0-100°C; soluble y estable en sistemas ácidos, estabiliza suspensiones y emulsiones; buena estabilidad frente a la congelación/descongelación, debido sin duda a su rigidez estructural y a la naturaleza extendida de sus moléculas (Cubero y col., 2002).

Las soluciones de goma xantana son altamente adelgazantes a la cizalla, la viscosidad disminuye con el desdoblamiento y la alineación de las macromoléculas en la dirección de la cizalla, sin embargo, a velocidades de cizalla altas, la viscosidad inicial se reconstruye inmediatamente. No hay histéresis evidente, por ejemplo, el adelgazamiento a la cizalla y la recuperación son instantáneos. Este comportamiento fluidificante mejora las cualidades sensoriales y la hacen un excelente estabilizante de emulsiones (Sharma, 2006). La goma xantana es compatible con la mayoría de los hidrocoloides incluyendo los almidones.

1.1.6 Desestabilización de emulsiones

Existen diferentes fenómenos que favorecen la pérdida de la emulsión obteniendo las dos fases separadas (Figura 10).

- *Floculación.* Precede normalmente a la coalescencia, la floculación consiste en la formación de aglomerados de las partículas de la fase dispersa, por causa de una colisión cuando las fuerzas de atracción superan a las de repulsión o cuando la viscosidad es muy elevada para provocar una sedimentación. También causa un pronunciado aumento en la viscosidad de la emulsión, inclusive puede llevar a la formación de un gel. Puede dar lugar a la separación de fases (Cubero y col., 2002).
- *Coalescencia.* Se da cuando los aglomerados formados en la agregación se unen dando lugar a partículas macroscópicas. Es el mecanismo principal por el cual una emulsión se mueve hacia su estado más termodinámicamente estable porque involucra una disminución en el área de contacto entre las fases acuosa y grasa. Igual que la floculación, puede dar lugar a la separación de fases. Se debe a la disminución en el grosor de la película que protege los glóbulos de grasa (Cubero y col., 2002).

- *Separación de fases (sedimentación y cremado)*. En general, los glóbulos de una emulsión tienen diferente densidad al fluido que los rodea, y entonces una fuerza gravitacional actúa sobre ellos. La sedimentación se produce cuando los glóbulos de la fase dispersa se mueven hacia la parte inferior de la emulsión, debido a que tienen una mayor densidad que el líquido que los rodea. Por el contrario, el cremado se da cuando la fase dispersa se desplaza hacia la superficie, debido a una menor densidad con respecto a la fase dispersante. La densidad de la mayoría de los aceites y/o grasas comestibles es menor que la del agua y por lo tanto existe una tendencia del aceite de acumularse en la parte superior de la emulsión, con lo que el agua se desplaza hacia la parte inferior. Aunque también depende del tipo de emulsión, una emulsión aceite-agua tiende al cremado, mientras que una emulsión agua-aceite tenderá a la sedimentación (Cubero y col., 2002; Mc Clements, 2004).

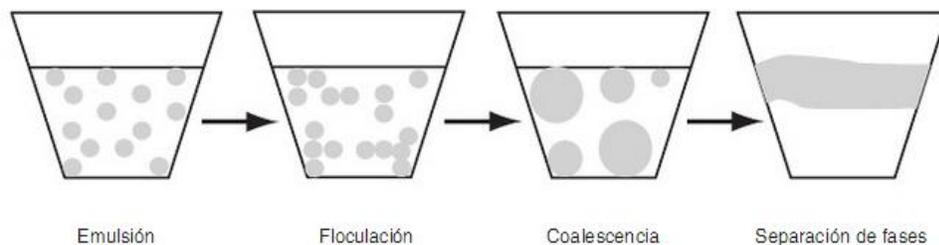


Figura 10. Esquema de los procesos de floculación, coalescencia y separación en dos fases de una emulsión (Badui, 2006).

1.1.7 Usos de las emulsiones

De acuerdo con Dalglish (2006) las emulsiones alimenticias se pueden subdividir en tipos ampliamente diferentes, dependiendo de sus usos finales.

- *Productos finales.* Productos como cremas para café y cremas líquidas son emulsiones relativamente simples, cuyo único requerimiento es el de permanecer estables ante el cremado y la coalescencia, durante su producción y almacenamiento. Por lo tanto, presentan un desafío menor al procesado que las emulsiones más complejas.
- *Ingredientes para otros productos.* En este caso, participan en la formación de otros productos con estructuras más complejas. De este tipo son los yogurts y otros

sistemas gelificados donde la emulsión inicial debe interactuar con otros ingredientes alimenticios, las cuales no deben ser desestabilizadas en el proceso.

- *Base para crear nuevas estructuras.* Los glóbulos de la emulsión sirven para crear nuevas estructuras. Como helados o productos batidos, donde se requiere que la emulsión se desestabilice como medio para crear una nueva estructura en el producto.

Es evidente que los requerimientos para la composición y las propiedades de los glóbulos de la emulsión son diferentes en estos tres casos. Pero es necesario (excepto en los productos más simples), que los glóbulos de la emulsión interactúen entre ellos o con los otros componentes alimenticios para dar las estructuras requeridas (Dalglish y col., 2006).

1.1.8 Crema

La NOM-185-SSA1-2002, denomina crema, al producto en el que se ha reunido una fracción determinada de grasa y sólidos no grasos de la leche, ya sea por reposo, por centrifugación o reconstitución, sometida a pasteurización o cualquier otro tratamiento térmico que asegure su inocuidad.

De acuerdo con el Codex Stan 288-1976, crema es el producto lácteo fluido comparativamente rico en grasas, en forma de una emulsión de grasa en leche desnatada (descremada), que es obtenida por la separación física de la leche.

1.1.8.1 Tipos de crema

De acuerdo con el Codex stan 288-1976, la crema puede ser clasificada de la siguiente manera, dependiendo de su origen, uso o de su composición.

- *Crema reconstituida.* Es la crema que se obtiene por reconstitución de los productos lácteos con o sin adición de agua potable y con las mismas características de la crema.
- *Cremas preparadas.* Son los productos lácteos que se obtienen sometiendo la crema, crema reconstituida y/o crema recombinada a tratamientos y procesos adecuados para obtener las propiedades características.

- *La crema líquida pre-ensvasada.* Es el producto lácteo fluido que se obtiene preparando y envasando crema, crema reconstituida y/o crema recombinada para consumo directo y/o para uso directo como tal.
- *La crema para montar o batir.* Es la crema fluida, crema reconstituida y/o recombinada destinada para ser montada o batida. Cuando el propósito de la crema sea para uso del consumidor final, la crema deberá haber sido preparada de manera que facilite el proceso de montado o batido.
- *La crema envasada a presión.* Es la crema fluida, crema reconstituida y/o crema recombinada que es envasada con un gas impelente en un envase de presión de propulsión y que se convierte en crema montada o batida cuando se saca del envase.
- *Crema montada o batida.* Es la crema fluida, reconstituida y/o recombinada a la cual se incorporó aire o gas inerte sin invertir la emulsión de grasa en leche descremada.

1.1.9 Crema para batir

La crema debe tener un contenido de grasa alrededor del 30-40%, debe ser de fácil batido y producir una fina espuma con un alto rendimiento (arriba de 80-90%). El producto final debe de ser de larga duración y estable durante el almacenamiento (Jakubczyc y col., 2006).

Pueden o no ser hechas con ingredientes lácteos. Su manufactura es la misma, pero los ingredientes varían. Se prepara la emulsión, mediante la homogeneización de la fase grasa en una solución que contenga suficiente emulsificante para crear una emulsión estable. La homogeneización crea glóbulos grasos de tamaño entre 0.5-2 μm . La fuente de grasa debe proveer suficiente material cristalino a la temperatura de batido (5-10 °C), lo cual implica un alto contenido de triglicéridos saturados. Dichos cristales son esenciales para crear estructuras durante el batido (Vega, 2006).

El proceso de producción de esta crema consiste en ajustar el contenido graso al porcentaje deseado, luego debe ser pasteurizada, enfriada a 2-4 °C y almacenada a estas temperaturas durante 48 horas, para dotar a la grasa de una consistencia uniforme y con ello su acondicionamiento para el batido manual o mecánico para la incorporación de aire. La adición de un estabilizador antes de la pasteurización ayuda enormemente a una eficiente incorporación del aire (Revilla, 1982).

1.1.9.1 Tipos de cremas para batir

Hay diferentes tipos de cremas para batir, los cuales dependerán del tipo de grasa que contengan.

- *Crema elaborada exclusivamente a partir de crema láctea natural* (homogeneizada o no). En estas cremas, los glóbulos de grasa están naturalmente recubiertos por la membrana natural de glóbulos de grasa (MGG).
- *Crema elaborada a base de crema láctea recombinada*: Las cremas lácteas recombinadas se elaboran a partir de grasa butírica anhidra que se emulsifica con proteínas lácteas y/o emulsificantes de bajo peso molecular (EBPM). La estabilidad a la coalescencia de estos productos depende del tipo de proteínas lácteas empleadas y de las condiciones de proceso (presión de homogeneización, temperatura), así como del empleo de EBPM (Van Lent y col., 2008).
- *Cremas mixtas*. Contienen tanto crema láctea como grasas vegetales de diferente origen (aceites de coco, palma, aceites parcialmente hidrogenados y sus mezclas). El tipo de grasa es fundamental porque determina el porcentaje de grasa sólida que presenta la grasa a diferentes temperaturas.
- *Cremas elaboradas con grasas vegetales*: como las arriba mencionadas, solas o en mezcla.

1.2 Crema batida

Las cremas batidas son emulsiones aireadas con rendimientos entre 100 a 300%, las cuales contienen más del 30% de grasa de leche (Kim y col., 2013). Una emulsión aireada es aquella a la cual se le ha introducido aire mediante el uso de fuerzas mecánicas, lo que propicia la desestabilización de su estructura y la consecuente formación de burbujas. Las cremas batidas pueden o no ser hechas con ingredientes lácteos. Su manufactura es la misma (generalmente consiste en dos etapas), pero los ingredientes varían (Vega, 2006).

Macroscópicamente, las emulsiones aireadas tienen una apariencia blanca opaca y una baja densidad relativa, debido a la alta inclusión de burbujas en el sistema (expresado en

rendimiento). La integridad de estos sistemas es debida, principalmente, a las interacciones entre las unidades de la estructura principal, las cuales son: burbujas de aire y glóbulos de aceite o grasa. Las gotas de la emulsión usualmente contienen grasa parcialmente cristalizada y por esta razón son llamados glóbulos de grasa (Van Aken, 2001).

Durante el batido en frío de una emulsión con grasa cristalizada el diámetro de las burbujas disminuye a medida que los glóbulos de grasa se agregan (coalescencia parcial), lo que resulta en la formación de una estructura rígida tridimensional, que rodea las burbujas de aire y proveen la fuerza mecánica necesaria para producir buena estabilidad. Las relaciones entre glóbulos de grasa, burbujas de aire y componentes de la fase continua son responsables de la estructura de la crema batida. Los glóbulos de grasa penetran en la interfase y se adhieren a las estructuras aire-agua (Jakubczyc y col., 2006).

1.2.1 Proceso de formación de la crema batida

1.2.1.1 Emulsión base

Se prepara la emulsión, mediante la homogeneización de la fase grasa en una solución que contenga suficiente emulsificante para crear una emulsión estable (y a una temperatura tal que asegure el estado líquido de la grasa). La homogeneización (con presiones de entre 10-30 MPa, dependiendo del contenido de grasa) crea glóbulos grasos de tamaño entre 0.5-2 μm . La fuente de grasa debe proveer suficiente material cristalino a la temperatura de batido (5-10 °C), lo cual implica un alto contenido de triglicéridos saturados. Dichos cristales son esenciales para crear estructura durante el batido (a través de un mecanismo conocido como coalescencia parcial—ver 1.2.2). De aquí que las grasas típicamente utilizadas para la elaboración de cremas batidas y helados incluyen: grasa butírica, aceites de coco o palma, aceites vegetales parcial o totalmente hidrogenados y sus mezclas (Vega, 2006).

Durante la homogeneización, las proteínas deben cubrir la superficie de los nuevos glóbulos formados para poder proveer de estabilidad a la emulsión. Sin embargo, dicha membrana no debe ser muy gruesa pues de lo contrario se impediría la estructuración del sistema. El caseinato de sodio, por ejemplo, forma membranas muy resistentes (y muy delgadas) a la agitación aún a concentraciones más bajas que los aislados de proteína de leche. De ahí que los emulsificantes de bajo peso molecular son usados para desplazar a las proteínas de la

membrana del glóbulo graso, haciendo a este último más susceptible a la coalescencia parcial durante el batido.

En el caso de la crema natural para batir, el glóbulo graso está rodeado de la membrana nativa. Su procesado (pasteurización y/o homogenización a baja presión) y adición de ingredientes (polisacáridos para incrementar viscosidad y emulsificante para promover la coalescencia parcial y el aireado), modifican la crema para su posterior batido. La membrana nativa del glóbulo graso facilita la estructuración de la crema durante el batido, por ello la homogeneización no es común. Si la crema se homogeniza, entonces la adición de monoglicéridos es necesaria (Vega, 2006).

1.2.1.2 Formación de la crema batida

El desarrollo de la estructura de la crema batida implica el establecimiento de interacciones entre glóbulos de grasa agregados y burbujas de aire. La espuma se estabiliza por los agregados de glóbulos de grasa unidos por grasa líquida, exudada de los mismos durante la cizalla impuesta en el batido (Chiralt, 1998).

El proceso de batido usualmente comienza cuando se enfría la crema a temperaturas no mayores de 5 °C, por lo que la mayoría de la grasa en los glóbulos es sólida. Al principio, antes de que cualquier cantidad apreciable de aire sea incorporada en la crema, la viscosidad aumenta más o menos exponencialmente a medida que pequeños cúmulos de grasa comienzan a formarse, y luego más rápidamente ya que éstos comienzan a solidificar.

En las primeras etapas de batido, cuando el aire comienza a ser incorporado, las burbujas de aire son bastante grandes, la superficie de las burbujas se recubre con una capa de cerca de 4 nm de grosor, que se compone principalmente de β -caseína. Con un mayor batido, algunos de los glóbulos de grasa se adsorben en esta superficie y eventualmente sobresalen en ella, por eso la forma de las burbujas de aire deja de ser esférica (Prentice, 1992).

Debido a que la mayor parte de la grasa en los glóbulos sigue siendo sólida, los glóbulos permanecen intactos hasta esta etapa. Si el batido continúa, algo del material de la membrana se elimina de las superficies, se rompe la membrana de grasa cristalina ahora debilitada y un poco de grasa líquida se agrega. Esto tiende a consolidar a los glóbulos de

grasa. Debido a la relativamente pequeña proporción de grasa que es líquida, hay una pequeña tendencia para que ésta se propague aún más en las superficies de las burbujas de aire. Al mismo tiempo, el tamaño total de las burbujas ha ido disminuyendo, el tamaño promedio eventualmente disminuye a 20 μm o menos y la distribución tiende a ser más uniforme (Prentice, 1992).

Mientras las burbujas de aire han ido disminuyendo en tamaño, los cúmulos de grasa han continuado creciendo a medida que más grasa líquida se agrega. Eventualmente se llega a un balance en el cuál hay suficientes glóbulos de grasa en los espacios intersticiales para reforzar la espuma y la crema adquiere algo de rigidez. Si el tamaño de las burbujas se reduce mucho debido al batido excesivo, los espacios intersticiales entre ellas se vuelven muy pequeños para mantener una malla fuerte y la espuma comienza a colapsar (Prentice, 1992).

En la Figura 11 se puede observar cómo se forma una emulsión aireada, empezando con la emulsión base con glóbulos de grasa parcialmente cristalizados, a la cual se le aplica un batido con lo que los glóbulos de grasa colisionan entre ellos, al estar casi sólidos solo se unen formando estructuras mayores, que posteriormente se adhieren a la interfase aire/agua, protegiendo a las burbujas de aire y finalmente forman una estructura tridimensional que le da forma a la emulsión aireada.

1.2.2 Coalescencia parcial

Cuando una emulsión aceite-en-agua es sometida a la agitación, la membrana de dos glóbulos que colisionan se rompe, la grasa líquida fluye y se funde para crear un glóbulo de mayores dimensiones, ésto se conoce como coalescencia. Si por el contrario, existen cristales en la fase lipídica, la coalescencia puede ser incompleta, ya que los glóbulos de grasa al estar casi sólidos y colisionar por efecto de la agitación no forman uno de mayores dimensiones, sino que quedan unidos parcialmente. Esto lleva a la formación de agregados de glóbulos irregulares que asemejan collares de perlas entrelazados en el espacio. Este proceso es conocido como coalescencia parcial (Figura 12).

Debido a la forma irregular de los agregados de grasa y al grado semi-cristalino de la misma, la viscosidad del sistema se incrementa. Si la agitación continúa, se forma una red

tridimensional a través de todo el volumen del sistema. Sin embargo, si la agitación es excesiva, se pueden crear «trozos» de mantequilla y desestabilizar la espuma (pérdida de aire) (Vega, 2006).

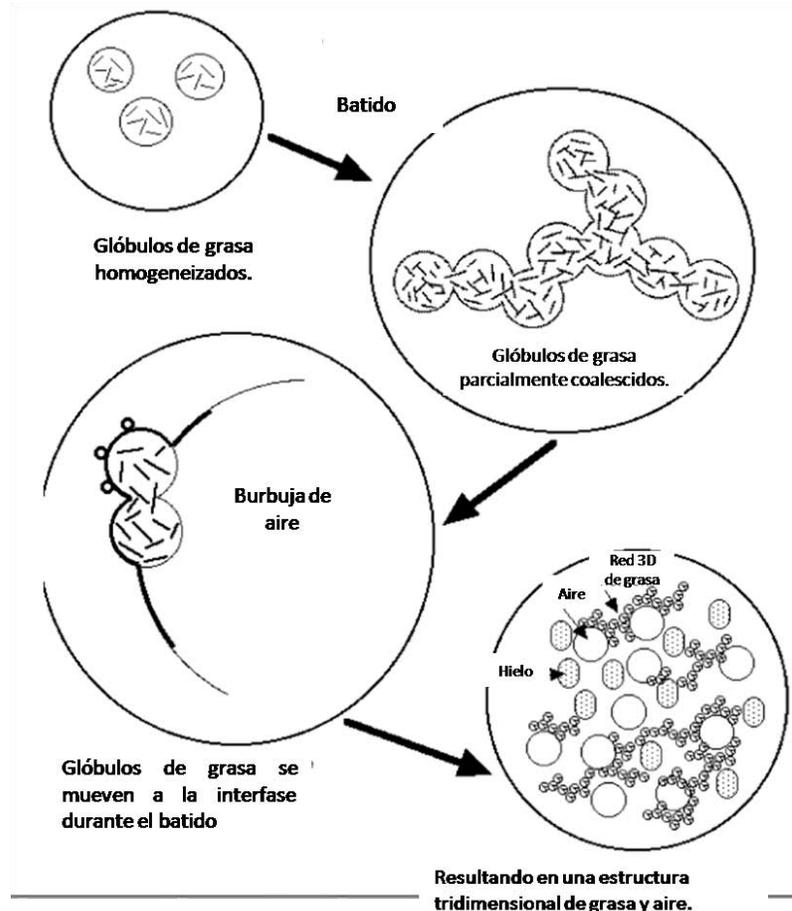


Figura 11. Esquema de la formación de la crema batida (Eisner y col., 2005).

Como se mencionó anteriormente, aunque es necesario que la emulsión base sea estable durante el almacenamiento, la interfase debe ser suficientemente delgada y/o débil para permitir la coalescencia parcial durante el batido. Esta es la función principal de los emulsificantes de bajo peso molecular añadidos a la crema para batir, que desplazan a las proteínas de la interfase. Los mono y diglicéridos insaturados son más efectivos en este aspecto que aquellos saturados, pero los mdg saturados promueven mejor la cristalización de la grasa, lo que a su vez promueve la coalescencia parcial (Vega, 2006).

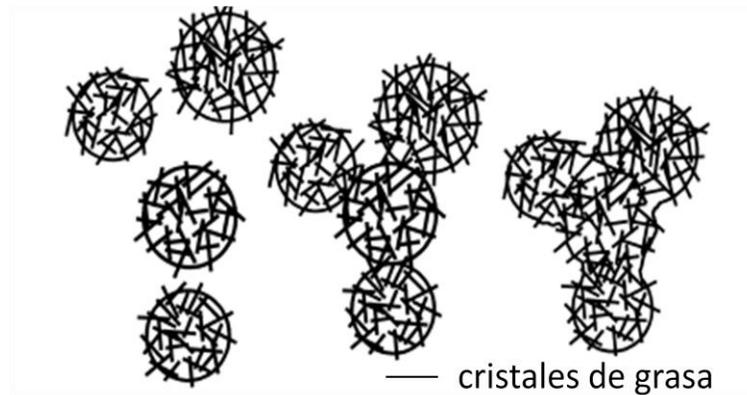


Figura 12. Coalescencia parcial de glóbulos con grasa parcialmente cristalizada (Rosseau, 2000).

Muchos estudios han demostrado la importancia de la coalescencia parcial de los glóbulos de grasa para impartir rigidez a las emulsiones batidas. En este proceso, la presencia de cristales de grasa, obstruye la completa fusión de los glóbulos de grasa en una única forma esférica. Esto conduce a una agrupación hacia estructuras más rígidas en la que los glóbulos de grasa originales permanecen reconocibles. La sensibilidad a la coalescencia parcial de los glóbulos de grasa depende del contenido de grasa sólida y de la orientación de los cristales con respecto a los glóbulos de la superficie. Esto puede ser alterado añadiendo ciertos surfactantes y sometiendo la emulsión a un tratamiento de atemperado. Lo anterior convierte la crema fluida en un material altamente viscoso (o hasta sólido). El incremento de la fracción de grasa de 25-38% refuerza la estructura de la crema batida (Van Aken, 2001; Vega, 2006).

1.2.3 Estructura de la crema batida

La estructura de la crema batida se puede visualizar de la siguiente manera (Figura 13).

- a) Los glóbulos de grasa están cubiertos por una membrana que ha sido diseñada para ser sensible a la coalescencia parcial.
- b) Burbujas de aire que están rodeadas por una interfase de glóbulos grasos parcialmente coalescidos los cuales las estabilizan/protegen contra el crecimiento y ruptura.
- c) Agregados de grasa que rodean (de maneras física y adsorbida) y que estabilizan la espuma.
- d) Una fase acuosa que está distribuida en forma de lamelas que también rodean a las burbujas de aire (Dalglish, 2006).

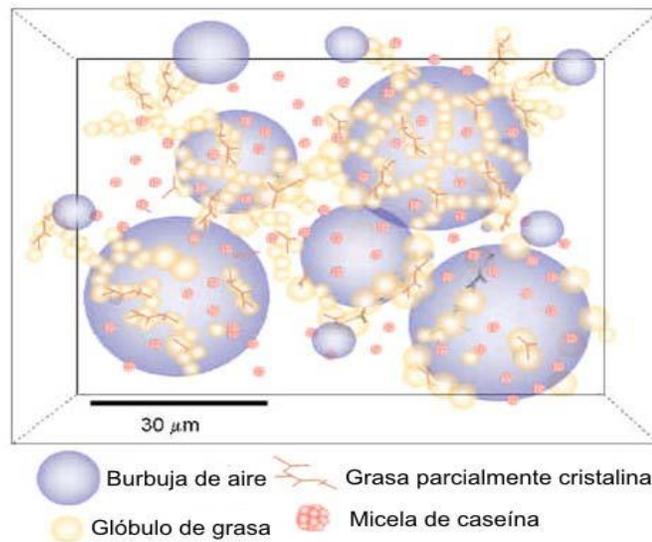


Figura 13. Ilustración tridimensional de la estructura de la crema batida (Vega, 2006).

Entre más pequeñas sean las burbujas, hay más interfase aire/agua para una fracción volumen de aire constante; por ende, se forman lamelas más delgadas. Algunas gomas (algarrobo, guar, xantana) pueden ser usadas para incrementar la viscosidad de la fase acuosa y reducir la cantidad de drenado de la espuma (Vega, 2006).

La Figura 14 muestra una microfotografía de una crema batida, dentro del círculo se puede observar uno de los glóbulos de grasa parcialmente coalescidos, que cubren la burbuja de aire (la de mayor tamaño). También se pueden observar los glóbulos de la emulsión, que rodean la burbuja y estabilizan el sistema.

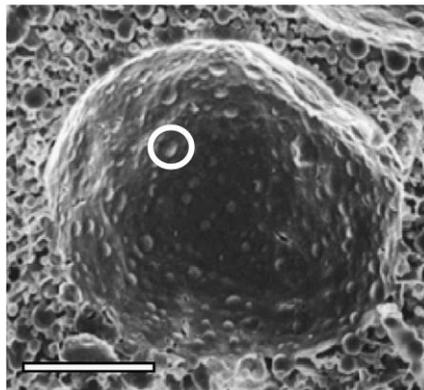


Figura 14. Micrografía electrónica de barrido de una burbuja de aire de una muestra de crema batida (Dalgleish, 2006).

1.3 Factores que influyen en la estabilidad de la crema batida

La estructura y resistencia de la crema batida está basada en el desarrollo de una interfase de aire-agua, puentes de grasa parcialmente coalescidas que unen las burbujas de aire y en la viscosidad de la fase acuosa. La facilidad y el grado de coalescencia parcial afectarán el tiempo de batido, el rendimiento y la estabilidad. Estas propiedades, a su vez, son afectadas por el contenido de grasa, las condiciones de proceso y la presencia de emulsificantes y estabilizantes (Smith y col., 2000).

1.3.1 Tipo de grasa

La presencia de grasa sólida dentro de los glóbulos es esencial para la aireación de una emulsión. Si la mayoría de la grasa es sólida, las gotas no se verán afectadas o deformadas por la aplicación de fuerzas de cizallamiento. En sistemas de emulsiones aireadas, las gotas con grasa sólida se requieren a menudo para formar redes parcialmente coalescidas y crear un comportamiento no newtoniano parecido a un gel con el fin de estabilizar y detener la estructura. Una estructura formada a partir de gotas de aceite líquido es muy diferente a la formada a partir de gotas de grasa sólida, por lo que afectará a la estructura y la textura final del producto. Sin embargo, si la grasa es muy sólida, es decir con un alto punto de fusión, la crema puede resultar demasiado dura a la temperatura de batido (lo cual afecta negativamente la incorporación de aire) y al ser consumida, dejará residuos de grasa no derretida en el paladar (los cuales son muy desagradables) (Vega, 2006; Arbolea y col., 2009).

Los tipos de grasa que se usan para la elaboración de cremas para batir son: grasa butírica, aceites de coco o palma, aceites vegetales parcial o totalmente hidrogenados y sus mezclas. Se debe tener en cuenta el punto de fusión, así como el contenido de grasa sólida a la temperatura de batido, de aplicación y de consumo (Vega, 2006).

1.3.1.1 Grasa vegetal

Son aquellas grasas que se derivan de fuentes vegetales. La mayoría de los aceites vegetales son extraídos de semillas o prensados de frutos como la aceituna o la palma. Los aceites crudos son mayormente triacilgliceroles (usualmente > 95%) acompañados por bajos volúmenes de ácidos grasos, monoacilgliceroles, diacilgliceroles, fosfolípidos, esteroleres

libres o acilados e hidrocarburos como los alcanos y carotenos. Los aceites de diferentes fuentes difieren en la composición de los ácidos grasos y de triacilgliceroles y en la composición de varios componentes menores. La mayoría de los aceites usados en la industria alimentaria han sido sometidos a procesos de refinación para aumentar el nivel de triacilgliceroles y reducir el nivel de otros componentes (Gunstone, 2006).

Ejemplos de las diferentes fuentes de grasas vegetales son soya, palma, canola, girasol, semilla de algodón, maní, semilla de palma, coco, aceituna, maíz, ajonjolí, linaza, cacao, entre otros.

Aceite de palma

El aceite de palma tiene una composición de ácidos grasos balanceada, en la cual el nivel de ácidos grasos saturados es casi igual al nivel de ácidos grasos insaturados. El ácido palmítico (44-45%) y el ácido oléico (39-40%) son los componentes principales junto con el ácido linoléico (10-11%) y además de contener sólo unos trazos de ácido linolénico.

El bajo nivel de ácido linoléico y la escasa concentración de linolénico hacen al aceite de palma relativamente estable a la deterioración oxidativa. Es semisólido a temperatura ambiente (25-30 °C). Puede ser fraccionado hacia una parte líquida (oleína) y una parte más sólida (estearina). La oleína contiene altos niveles de ácidos oléico y linoléico (10-13%) comparado con el aceite (Gunstone, 2002).

El contenido de grasa sólida determina sus usos y aplicaciones. La manteca Colón 5P es un ejemplo de un producto a base aceite de palma, es de la línea de mantecas Colón, de la empresa Maravilla. Éste producto es un líquido oleoso a partir de los 35 °C, con un contenido de sólidos de 3-6%, mientras que a 10 °C hay un contenido de sólidos de 42-50%.

1.3.2 Tipos de emulsificantes

Las propiedades físico-químicas de las moléculas emulsificantes en la interfase de las gotas de aceite han demostrado tener un impacto importante en la estabilidad y las propiedades físicas de un número de emulsiones donde se produce la coalescencia parcial. Los emulsionantes que forman películas más gruesas y más viscoelásticas en la interfase aceite-agua son más resistentes a la penetración por los cristales de grasa y por lo tanto

proporcionan una mayor resistencia a la coalescencia parcial. En consecuencia, la tasa de coalescencia parcial es menor para las gotitas estabilizadas por proteínas de la leche que para aquellas estabilizadas por agentes tensoactivos de bajo peso molecular (Thanasukarn y col., 2004).

Además de influir en la capacidad de un cristal de grasa para penetrar las membranas interfaciales que separan las fases grasas, los tensoactivos también pueden influir en la nucleación y la cristalización de las grasas emulsionadas. Por ejemplo, la adición de tensoactivos hidrófobos (poliésteres de sacarosa) a la fracción de aceite de palma de emulsiones de aceite-en-agua, antes de la homogeneización, puede acelerar la velocidad de nucleación, pero reducir la tasa de crecimiento de los cristales (Thanasukarn, y col., 2004).

Durante el proceso de emulsificación, se ha demostrado la competencia por la adsorción entre diferentes proteínas y entre emulsificantes y proteínas, la cual ocurre en la interfase de la emulsión donde se compite por la adhesión, afectando de esta manera la estabilidad de la emulsión. El grado en el cuál la proteína es desplazada depende de la concentración y el tipo de emulsificante y de las condiciones ambientales, como la temperatura. Los emulsificantes desplazan más proteína cuando son enfriados a temperatura de 4 °C, como capas adsorbidas de estas moléculas se someten a cambios de fase complejos, resultando en la expulsión de agua y proteína de la capa de emulsificante (Euston y col., 2001; Rosseau, 2000).

El comportamiento de adsorción competitiva de proteínas y emulsificantes en la interfase influirá en el papel de los cristales de grasa en la misma, así como las interacciones entre las proteínas y los cristales de grasa en la región interfacial pueden afectar a la resistencia mecánica de la película interfacial (Rosseau, 2000).

1.3.2.1 Emulsificantes de bajo peso molecular (EBPM)

La desestabilización de la emulsión no puede ocurrir sin la presencia de los EBPM, ya sea de origen natural (fosfolípidos y monoglicéridos) o artificial. Los EBPM son capaces de desplazar a las proteínas de la superficie de los glóbulos de grasa y disminuir la estabilidad de la emulsión hacia la coalescencia. La segunda función de los EBPM que es importante en la crema batida y también en la formación de la estructura de los productos batidos, es el efecto que tienen sobre la cristalización de la grasa y la estructura del cristal en los glóbulos

de la emulsión, lo que significa que los glóbulos de grasa están disponibles para absorber y estabilizar las burbujas de aire durante el proceso de batido (Euston y col., 2001).

1.3.2.2 Proteínas

Las espumas lácteas son sistemas coloidales en las cuales las burbujas de aire se estabilizan por una matriz compuesta de elementos de la leche. Los agentes de superficie activa en la leche son principalmente proteínas. Las proteínas interactúan con la grasa de la emulsión base y el aire, que es incorporado en la mezcla. Las propiedades espumantes de las proteínas son debidas a su habilidad para: 1) absorberse en la interfase aire/agua, que lleva a una disminución de la tensión superficial, 2) para desplegarse a la interfase con la orientación de los grupos hidrófilos e hidrófobos en las fases acuosa y no acuosa, respectivamente, y 3) para formar una película usando las interacciones de las proteínas parcialmente desnaturalizadas (Borcherding y col., 2008; Eisner y col., 2005).

Al igual que otras propiedades funcionales de las proteínas, el comportamiento espumante está determinado por la composición y las características estructurales y físicas, tales como el peso molecular, secuencia y composición de aminoácidos, estructura terciaria, carga superficial, grado de desnaturalización e hidrofobicidad. Las proteínas parcialmente desnaturalizadas son más hidrófobas. La hidrofobicidad expuesta de las proteínas acelera la adsorción en la interfase aire-agua. Además, el espumado depende del tipo de proteína usado, del pre-tratamiento, del proceso de fabricación y de los factores externos, incluyendo la composición mineral, la fuerza iónica, el grado de desnaturalización y los valores de pH. Con base en experimentos se estableció que la estabilidad de la espuma de leche aumentó con un contenido cada vez mayor de β -caseína hasta un cierto grado y luego se mantenía constante (Borcherding y col., 2008).

1.3.3 Estabilizantes de la crema batida

La adición de estabilizantes que aumentan la viscosidad de la fase continua disminuyen la difusión del suero de la espuma, e interaccionan con las proteínas. Algunos estabilizantes como los derivados de la celulosa, poseen además propiedades tensoactivas (Dutta y col., 2004).

1.3.3.1 Polisacáridos

Los polisacáridos se utilizan ampliamente en alimentos como espesantes, estabilizantes y gelificantes. Aumentan la viscosidad de la fase continua de las espumas reduciendo con esto la velocidad de drenado de líquido. Pueden además gelificar atrapando las gotas de la emulsión y estabilizándolas contra la floculación y coalescencia, también pueden interactuar directamente con el material adsorbido en la interfase de las gotas de la emulsión. Los polisacáridos son esencialmente hidrofílicos (con excepciones como algunas galactomanas, almidones modificados, goma arábica y algunos derivados de celulosa).

Además de estos ejemplos, los polisacáridos aniónicos pueden interactuar con las proteínas adsorbidas de carga opuesta ya sea en la interfase o en la fase continua. El empleo de polisacáridos tiene impacto no solamente en la estabilidad de las emulsiones sino también sobre su comportamiento reológico. En la crema batida, el efecto se ha reportado en las propiedades espumantes (rendimiento y tiempo de batido), en la estabilidad y en las propiedades reológicas y texturales (Casas, 2013a).

Se han realizado diversos estudios sobre la influencia de los polisacáridos en las cremas batidas, por ejemplo, Zhao y col. (2009) evaluaron la influencia de la goma xantana en las propiedades físicas y texturales de cremas batidas lácteas, los mismos autores presentaron otro estudio utilizando hidroxipropil-metil-celulosa (HPLC), estudiando su efecto en las propiedades espumantes y texturales de crema batida.

Por otro lado Camacho y col. (1998) estudiaron el efecto de la adición de carragenina y goma algarrobo en la estabilidad y propiedades mecánicas de cremas lácteas. Mientras que Stanley y col. (1996) estudiaron el efecto de un estabilizante comercial (0.35%) a base de mono y diglicéridos, fosfato y citrato de sodio, goma guar, carragenina, goma de algarrobo y lecitina de soya, sobre las propiedades reológicas, espumantes y estabilidad de crema batida láctea con 36 % de grasa.

1.3.4 Proceso de elaboración

En la elaboración de una crema batida se deben tomar en cuenta diferentes factores, entre los más importantes destacan los siguientes.

- *Temperatura.* La crema debe encontrarse a temperaturas cercanas a los 5 °C, para permitir la coalescencia parcial de los glóbulos de grasa y así dar paso a la formación de la estructura de la crema batida. Esto también permite que los emulsificantes desplacen más proteína cuando están a esa temperatura, como capas adsorbidas de estas moléculas que experimentan cambios de fase complejos, resultando en la expulsión de agua y proteína de la capa de emulsificante (Euston y col., 2001).
- *Tiempo.* Jakubczyk (2006) reportó que a tiempos muy largos de batido se obtiene un menor rendimiento y por lo tanto una espuma con un menor volumen. Durante el batido el tamaño de las burbujas disminuye constantemente, si el tiempo de batido es muy largo las burbujas comienzan a colisionar entre sí, destruyendo la estructura de la crema. Conforme transcurre el tiempo de batido aumenta la consistencia de la crema batida así como el rendimiento, la crema batida tiene un punto donde no es posible la incorporación de más aire dentro de su estructura.
- *Tipo de batidor.* Es recomendable emplear un batidor tipo globo, para poder incorporar de una mejor forma el aire. Un movimiento planetario, ayuda a cubrir todo el volumen de la crema (Van Aken, 2001).

1.4 Mecanismos de desestabilización de las cremas batidas

Las cremas batidas deben ser estables el mayor tiempo posible ante la variación de factores como el aumento de la temperatura, la cantidad de emulsificante o estabilizante presente, entre otros. Las cremas batidas pueden sufrir diferentes mecanismos de desestabilización, lo que llevan a la consecuente destrucción de la espuma, los mecanismos de desestabilización más importantes se presentan a continuación.

1.4.1 Drenado

Las emulsiones y particularmente las espumas son susceptibles al drenado de la película, o al cremado, donde el líquido fluye fuera de la espuma como resultado de la fuerza de gravedad entre las burbujas dispersas como se muestra en la Figura 15, dejando que las celdas de aire sean forzadas a juntarse, formando eventualmente una película delgada. Esta

película se vuelve constantemente delgada hasta que se rompe y dos burbujas adyacentes coalescen formando una más grande (Green y col., 2013).

La proporción de líquido disminuye debido a la diferencia de curvatura entre los bordes de Plateau (Figura 15) y la parte plana de las películas según la ley de Laplace, producen un gradiente de presión. Ésta es la fuerza motriz que desplaza el líquido del centro de las películas hacia los bordes de Plateau, gracias a un mecanismo llamado succión capilar. Este líquido es seguidamente drenado por la gravedad hacia la parte inferior de la espuma en los bordes de Plateau (Salager y col., 1998).

1.4.2 Maduración de Ostwald

La maduración de Ostwald es el proceso por el cual las burbujas más grandes crecen a expensas de las de menor tamaño, debido a las diferencias en su potencial químico que es debido a la diferencia en su capilaridad. El crecimiento ocurre por la difusión del componente dispersado a través de la fase continua. Las propiedades dinámicas de superficie como la elasticidad interfacial tienen un efecto significativo en el grado de la maduración de Ostwald. La desproporción puede ser detenida si la superficie de la burbuja es puramente elástica y la elasticidad dilatacional superficial es mayor que la mitad de la tensión superficial (Dutta y col., 2004).

El crecimiento de una gota grande ocurre a expensas de una gota más pequeña, por difusión molecular del soluto a través del medio circundante. La fuerza motriz para este proceso, es la diferencia en la concentración de la fase dispersa (soluto) a la interfase aire-líquido de burbujas de diferente radio.

1.4.3 Difusión de gas y colapso de la espuma

El proceso de difusión de gas también debe su origen al hecho de que la presión dentro de las burbujas es más grande que la presión atmosférica, debido a la tensión superficial y a la curvatura de las burbujas. Debido a la diferencia de presiones, el gas se difunde fuera de la burbuja cuando la emulsión aireada está en contacto con la atmósfera y como resultado el tamaño de burbuja así como el volumen de la espuma se reducirán con el tiempo. Mientras el tamaño de burbuja disminuye, la diferencia de presiones aumenta y se esperaría una

aceleración de la pérdida de gas con el tiempo. La viscoelasticidad de la superficie de la burbuja reducirá el grado de difusión del gas (Dutta y col., 2004).

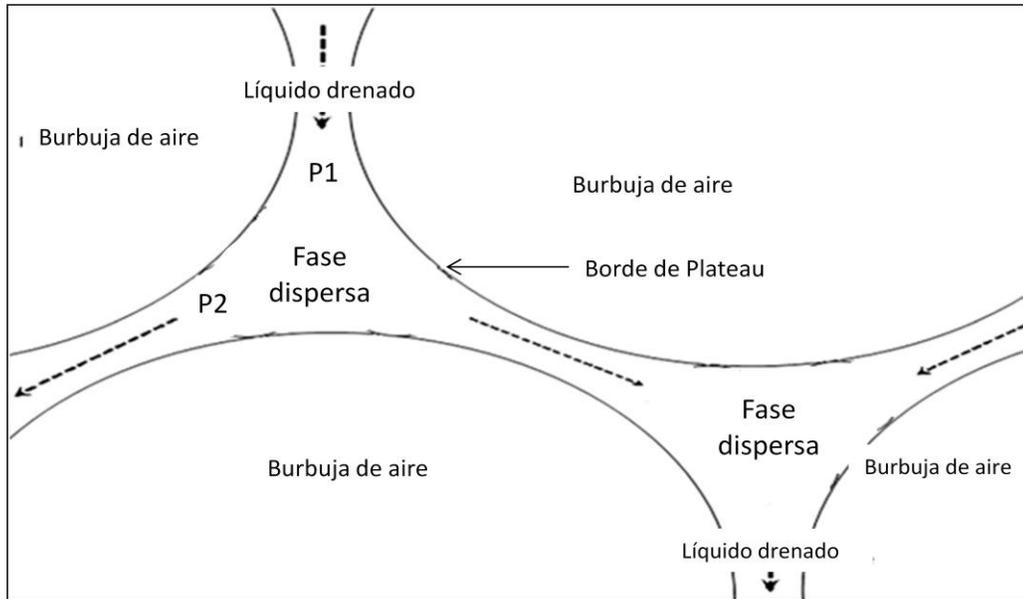


Figura 15. Diagrama de drenado del líquido entre las burbujas de aire (Green y col., 2013).

1.5 Estudios realizados con cremas batidas y emulsiones

En el Cuadro 1 se reportan algunos trabajos que se han realizado con respecto a las emulsiones así como su aplicación en las cremas batidas. Estos trabajos fueron consultados para formar parte de los antecedentes y se encuentran organizados por el tipo de estudio que se llevó a cabo.

Cuadro 1. *Enfoque de estudios realizados sobre cremas batidas y emulsiones.*

Tipo de estudio	Autores	Técnicas empleadas
Proceso de batido	Jakubczyk, y col. (2006)	<ul style="list-style-type: none"> • Módulo elástico y viscoelástico (G' y G'') en un reómetro. • Medida de la tensión interfacial en la crema antes de batir (tensiómetro). • Rendimiento por diferencia de densidades, la densidad se obtuvo con el peso de una muestra de 44 mL. • Tamaño de burbuja con un microscopio óptico.
	Van Aken, G. A. (2001)	<ul style="list-style-type: none"> • Rendimiento por diferencia de densidades, se utilizó un tubo calibrado. • Pérdida de suero midiendo el volumen de suero drenado de una muestra de 30 g, en 2 h. • Firmeza en un texturómetro. • Fracción de glóbulos de grasa por el método de Gerber.
Efecto del emulsificante	Dokic y col. (2012)	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño de partícula y distribución del tamaño de partícula por microfotografía en un microscopio óptico. • Comportamiento reológico en un viscosímetro con cono y plato. • Grado de cremado midiendo el volumen del suero transparente formado en el fondo.
	Kim y col. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de las propiedades interfaciales en un reómetro. • Observación microscópica con microscopio óptico (para emulsión y crema batida). • Distribución del tamaño de burbuja por dispersión de luz, para emulsión base y crema batida. • Rendimiento por diferencia de pesos. • Firmeza de la crema batida utilizando un texturómetro y una sonda cilíndrica.

	<p>Van Lent y col. (2008)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño del glóbulo de grasa por dispersión de luz. • Viscosidad de la emulsión en un viscosímetro. • Estabilidad al cremado con un analizador de estabilidad. • Determinación del contenido de proteína libre. Centrifugado del suero y después análisis con método Kjeldahl. • Rendimiento por diferencia de densidades • Estabilidad al drenado (crema batida) por diferencia de peso. • Determinación de la estabilidad de la crema batida durante el congelado por diferencia de pesos.
Efecto de la grasa	<p>Arboleya y col. (2009)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Distribución del tamaño de burbuja mediante escaneo de muestras. • Comportamiento reológico de la emulsión y la crema batida en un reómetro. • Propiedades reológicas de la crema a diferentes tiempos de batido (2-16 min).
	<p>Relkin y col. (2005)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Distribución del glóbulo de grasa, área de la superficie, diámetro medio, agregación de la gota de grasa, por dispersión de un haz de luz. • Estabilidad cambios en el diámetro medio de partícula. • Concentración de proteína en la superficie e identificación de proteínas adsorbidas, método Kjeldahl combinado con Mojonier.
	<p>Tcholakova y col. (2006)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño de partícula con microscopio óptico con un programa elaborado por los autores. • Determinación de la adsorción de proteína por disminución en la concentración de proteína. • Caracterización de la coalescencia de las gotas, técnica de captura filmica y por centrifugación de las emulsiones.
Efecto de la temperatura	<p>Borcherding y col. (2008)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Viscosidad de las muestras de leche descremada a 50 °C, con un reómetro (emulsión). • Tensión superficial por el método de la gota colgante (emulsión). • Estructura interna con microscopio electrónico (emulsión). • Drenado por cantidad de líquido separado (crema

		<p>batida).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Densidad relación masa/volumen (crema batida). • Distribución del tamaño de burbuja con un microscopio óptico con cámara.
	Drelon y col. (2006)	<ul style="list-style-type: none"> • Propiedades reológicas con pruebas oscilatorias con un reómetro. • Tamaño de partícula (emulsión y crema batida) con la técnica de dispersión de luz. • Calorimetría diferencial de barrido. Determinar la influencia del temperado en las estructuras formadas. • Contenido de grasa sólida con un espectrómetro de impulsos de baja resolución.
	Thanasukarn y col. (2004)	<ul style="list-style-type: none"> • Efecto de la temperatura de almacenamiento. • Separación gravitacional midiendo la altura de líquido separado. • Separación de aceite con el método Palanuwech y col. 2003. • Tamaño de partícula con un analizador láser de partículas.
Efecto de polisacáridos	Allen y col. (2008)	<ul style="list-style-type: none"> • Cremas batidas no estabilizadas por coalescencia parcial. • Rendimiento, se removía espuma cada 5 min. • Estabilidad. Líquido drenado de muestras de 10 g en un período de 5 h. • Deformación oscilatoria (G' y G'') de la crema batida con un reómetro.
	Li y col. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Distribución del tamaño de partícula con un analizador de partículas. • Observación microscópica con un microscopio óptico. • Estabilidad en el almacenamiento por altura del cremado. • Propiedades reológicas.
	Zhao y col. (2009)	<ul style="list-style-type: none"> • Medida del tamaño de partícula con un analizador de partículas. • Coalescencia parcial con el método Palanuwech y col. 2003. • Rendimiento por diferencia de pesos. • Características texturales, firmeza, consistencia y cohesividad.

1.6 Pruebas en emulsiones y cremas batidas

1.6.1 Pruebas en emulsiones

1.6.1.1 Reología

Las propiedades reológicas son necesarias para diseñar adecuadamente operaciones unitarias y determinar las características organolépticas percibidas por los consumidores (Gabriele y col., 2009).

Las emulsiones alimenticias aceite en agua, dependiendo de la fracción volumen de la fase dispersa, el tamaño de glóbulo y las características de la fase continua, pueden exhibir diferentes comportamientos reológicos, que van desde fluidos de baja viscosidad (leche), a geles viscoelásticos (yogurts y postres) hasta sólidos duros (mantequilla y margarina). Consecuentemente, una variedad de métodos instrumentales han sido desarrollados para caracterizar sus propiedades reológicas (McClements, 2004). Este comportamiento puede ser evaluado por medio de pruebas de cizalla rotacional estacionaria (comportamiento al flujo) y pruebas de cizalla oscilatoria (comportamiento viscoelástico).

- *Comportamiento al flujo.* Se utilizan viscosímetros mecánicos y reómetros, usualmente controlados por computadora, pueden ofrecer evaluaciones reológicas en función del tiempo, la temperatura, la velocidad de cizalla, o la frecuencia oscilatoria. La muestra a ser analizada se coloca en una celda que puede mantener la temperatura constante, donde está sujeta a velocidades de cizalla controladas o a esfuerzos controlados. La deformación ó el esfuerzo resultante son medidos por el instrumento y también las propiedades reológicas de la muestra pueden ser determinadas por la relación esfuerzo-deformación (McClements, 2004).

Los viscosímetros de cilindros concéntricos son los más utilizados para medir el comportamiento reológico de las emulsiones, su principio es transferir la cantidad de movimiento desde el cilindro que rota hacia el cilindro en el que está contenida la muestra. Se mide el par de torsión o torque del motor, requerido para mover el cilindro y se transforma a esfuerzo de cizalla. La velocidad de rotación se transforma en velocidad de cizalla con la constante de proporcionalidad respectiva (Martínez, 2013).

- *Comportamiento viscoelástico.* Se utilizan reómetros, en los que se hacen pruebas de cizalla oscilatoria ó pruebas dinámicas. En este tipo de experimentos la deformación aplicada varía sinusoidalmente con el tiempo. El esfuerzo varía con la misma frecuencia, pero presentando un desfase con respecto a la deformación. Se pueden obtener los módulos de almacenamiento, G' que representan el componente elástico y de pérdida, G'' que representa el componente viscoelástico.

1.6.1.2 Tamaño de partícula

Es uno de los parámetros más importantes en la caracterización de emulsiones, que afectan la estabilidad, la resistencia al cremado y la reología. La fase dispersante contiene una red tridimensional, debido a la presencia de hidrocoloides y otros componentes estructurales, por lo tanto, las partículas no pueden ser consideradas como esferas rígidas aisladas y las interacciones partícula-partícula pueden ser muy importantes en la determinación de las propiedades de la emulsión.

Debido a la relevancia de estos parámetros, se describen en la literatura muchas técnicas para el análisis del tamaño de partícula tales como, microscopio óptico, microscopio electrónico de barrido (SEM por sus siglas en inglés), microscopio de transmisión electrónica (TEM por sus siglas en inglés), por dispersión de luz, espectrometría de ultrasonido, resonancia magnética nuclear (NMR por sus siglas en inglés) todas estas técnicas presentan ventajas y desventajas las cuales se mencionan a continuación (Gabriele y col., 2009).

- *Microscopía.* Es muy fácil de usar y es considerada como el método tradicional, sin embargo, es una técnica de consumo de tiempo, la preparación de la muestra puede alterar el espécimen a ser analizado y solo se obtienen fotografías en dos dimensiones de la muestra.
- *Microscopía electrónica (SEM o TEM).* Es una herramienta poderosa que puede dar información de la morfología de los glóbulos de grasa y de la micro-estructura de la muestra, la dificultad de esta técnica es la de preparar la muestra sin alterar su estructura (Gabriele y col., 2009).

- *Difracción de un rayo de luz láser* (Figura 16). Se basan en la dispersión de la luz por las partículas, se utiliza ampliamente para determinar el tamaño de glóbulo, sin embargo, puede ser utilizado sólo si las emulsiones son diluidas (fracción de volumen inferior a 1%) y transparentes. Por lo tanto, las emulsiones a menudo tienen que ser diluidas y agitadas para homogeneizar la muestra y en la estructura pueden producirse alteraciones (Gabriele y col., 2009).

Este método se basa en la teoría de Fraunhofer, la cual dice que cuando una partícula es iluminada por una fuente de luz monocromática, un patrón de difracción en forma de anillos concéntricos es obtenido, donde la distancia entre cada uno de los anillos depende del tamaño de la partícula (Cilas, 2013).

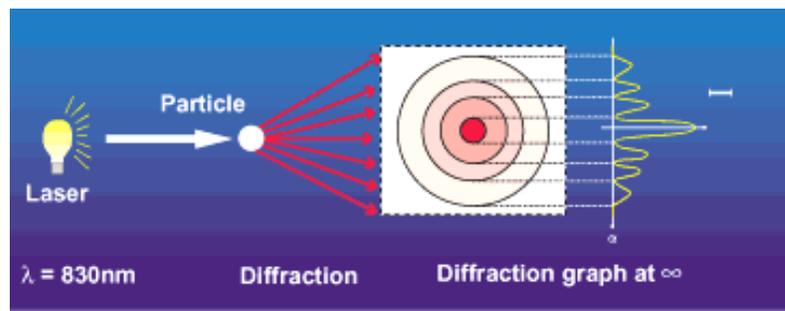


Figura 16. Esquema del principio de la difracción de un rayo de luz (Cilas, 2013).

- *Resonancia magnética nuclear (NMR)*. Se puede utilizar para estudiar sistemas opacos y concentrados y los resultados no se ven afectados por posibles contaminantes (por ejemplo, burbujas de gas o sólidos en suspensión). Por último, es de destacar que las técnicas de NMR son métodos no destructivos, dando información acerca de la estructura del material sin alterar la muestra (Gabriele y col., 2009).

1.6.1.3 Estabilidad

Los siguientes son algunos ejemplos de las técnicas que se pueden emplear para medir la estabilidad de las cremas batidas, la diferencia está en el grado de exactitud de cada una.

- *Grado de clarificado*. Dokic y col. (2012) midieron el volumen del suero transparente formado al fondo del cilindro de medición, éste puede ser notado visualmente y expresado por Hs, el volumen total de la muestra es He y H es el índice de cremado.

$$H = \frac{H_s}{H_e} * 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

- *Transmisión-retrodispersión de luz.* El cuál consiste en hacer incidir en la muestra, colocada en la celda de medición, una fuente de luz (infrarrojo cercano). La fuente de luz incide a lo largo de la altura de la celda de medición (ver Anexo 1).

En función de la concentración y el tamaño de las partículas, la luz incidente sufre una serie de cambios. Algunos fotones sufren un gran número de acontecimientos de dispersión antes de abandonar el medio, fenómeno llamado retrodispersión, estos acontecimientos se deben a las partículas presentes en el medio, ya que refractan la luz que incide en el tubo. Otros fotones sufren pocos acontecimientos de dispersión antes de abandonar el medio, fenómeno conocido como transmisión (Figura 17), en este caso una disminución en el tamaño o la cantidad de partículas presentes en el medio, permite el paso de la luz. Se obtiene el porcentaje de luz transmitida y retrodispersada en función de la longitud del tubo (Casas, 2013a).

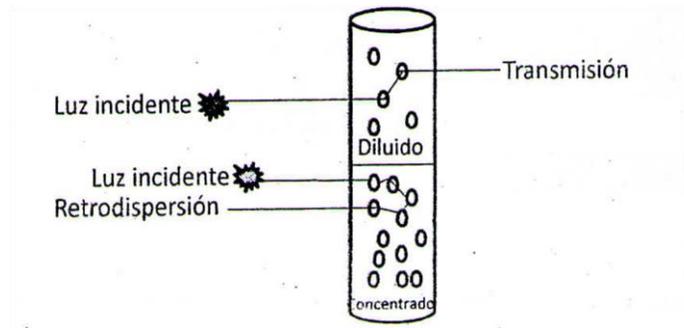


Figura 17. Fenómenos de transmisión y retrodispersión (Casas, 2013a).

1.6.2 Pruebas en crema batida

1.6.2.1 Tamaño de burbuja

El tamaño de la burbuja es el parámetro primario para determinar el comportamiento y contribución de la estructura a la textura del producto alimenticio. En una espuma existe una amplia distribución de tamaño de burbujas, algunos tamaños contribuyen a la apariencia y otros a la textura (Castillo-Castañeda y col., 2006).

Las técnicas microscópicas son muy útiles para el estudio de las espumas, ya que nos permiten visualizar el acomodo de las microestructuras relevantes en el producto, tales como glóbulos de aceite, cristales de grasa, agregados de proteína y burbujas de aire (Leser y Michel, 1999). Los siguientes son ejemplos de técnicas microscópicas.

- *Microscopía electrónica de barrido*. Ha sido usado extensivamente para estudiar las microestructuras de las espumas lácteas. Un ejemplo es el método cryo-SEM, se ha utilizado para evaluar la distribución de las burbujas de aire durante el congelado, el endurecimiento y el almacenamiento de helado. La principal ventaja de este método es que las muestras se mantienen en su estado nativo debido a las temperaturas extremadamente frías (Chang y Hartel, 2002).
- *Microscopía de luz óptica*. Ha sido utilizado para monitorear las burbujas de aire en espumas lácteas. De hecho los primeros intentos para visualizar la estructura del helado se hicieron con esta técnica. Las principales ventajas de la microscopía de luz son la conveniencia y relativa simplicidad de la preparación de muestras. Sin embargo, el microscopio óptico tiene una resolución limitada ($2 \mu\text{m}$) y la preparación de las muestras generalmente destruye las demás estructuras presentes (Chang y Hartel, 2002).

1.6.2.2 Densidad

La densidad de una sustancia homogénea es una propiedad física que la caracteriza y es definida como el cociente entre la masa y el volumen de la sustancia que se trate. Esta propiedad depende de la temperatura por lo que al medir la densidad de una sustancia se debe considerar la temperatura de medición. En el caso de sustancias no homogéneas lo que obtenemos al dividir la masa y el volumen es la densidad promedio (Patiño, 2010).

Para medir la densidad de las cremas batidas, se ha reportado de diferentes estudios (por ejemplo Jakubczyk y col. 2006) que se puede partir de un volumen conocido de crema batida, para después obtener el peso de este volumen y así poder obtener la relación masa/volumen, que nos proporciona la densidad de la muestra.

1.6.2.3 Textura

La cuantificación y el análisis sistemático de la textura son muy importantes para el desarrollo de productos. Si los atributos texturales pueden ser relacionados con una o más propiedades físicas, entonces éstas pueden ser usadas para monitorear la calidad durante el procesado y almacenamiento (Green y col., 2013). Las propiedades texturales pueden ser medidas objetivamente con analizadores de textura o texturómetros.

Los analizadores de textura, son instrumentos computarizados que pueden medir y/o controlar fuerza, distancia y tiempo. La deformación se puede efectuar a velocidad controlada. Arrojan como resultado curvas F-t, F-d, d-t. Cuentan con una amplia variedad de dispositivos que aplican deformación o fuerza bajo tensión, compresión, corte o combinaciones de éstos. De las curvas obtenidas pueden extraerse varios parámetros en función del material y el tipo de prueba efectuada (Casas, 2013c).

Los principales atributos texturales de la crema batida pueden ser obtenidos de dos diferentes pruebas adhesividad por penetración y retirada y extrusión, las cuales se explican a continuación.

Adhesividad por penetración y retirada

La adhesividad es un importante atributo sensorial de los alimentos semi-sólidos. La sensación de pegajosidad en la boca ha sido descrita por los panelistas como: una sensación pegajosa que puede ser percibida por la lengua y el paladar. Subjetivamente la adhesividad es el resultado de la fuerza requerida para separar la lengua del paladar, cuando un producto semi-sólido es manipulado entre la lengua y el paladar, pero también se asume que sea dependiente del trabajo requerido para hacerlo (Dunnewind y col., 2004).

La prueba de adhesividad por contacto y retirada consiste en colocar la muestra en una caja petri, el dispositivo (cono o cilindro) penetra hasta cierta distancia de la muestra y se retira a una velocidad alta, hasta una distancia suficiente para que la muestra se desprenda completamente del dispositivo, lo que da como resultado una curva de la cual se pueden obtener parámetros como dureza, untabilidad, adhesividad, entre otros (Casas, 2013c).

Extrusión positiva

Se aplica una fuerza a un alimento hasta que fluye a través de una o varias salidas, la fuerza máxima requerida para completar la extrusión del material y el área bajo la curva fuerza-distancia (trabajo) se miden como índices de textura de la muestra. La extrusión positiva, se utiliza en las muestras semisólidas que fluyen bajo la aplicación de fuerzas como lo son el puré de papa, los frijoles refritos, la crema batida, la masa, entre otros. En la prueba la muestra es colocada en una celda en cuya base se coloca un disco con un orificio central de diámetro variable dependiendo de la consistencia de la muestra. La muestra se comprime con una placa que la obliga a salir del orificio (Casas, 2013c).

1.6.2.4 Estabilidad

A continuación se presentan algunos ejemplos de técnicas empleadas para medir la estabilidad en la crema batida.

- Cantidad de suero drenado. Van Lent y col. (2008) determinaron la estabilidad de cremas batidas, con el peso del suero drenado en una hora, en relación al peso total de la muestra.
- Copas de estabilidad. Se mide la cantidad de líquido drenado cada determinado tiempo o el tiempo que tarda en drenar cierto volumen de líquido. Es una alternativa económica, a la técnica de dispersión de luz, aunque es menos exacta.
- Dispersión de luz múltiple. Consiste en la medición de las intensidades de retrodispersión y de la transmisión frente a la altura de la muestra con el fin de detectar el cambio de tamaño de partícula (coalescencia, floculación) y la separación de fases (sedimentación).

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Objetivo general y objetivos particulares

Objetivo general

Evaluar la influencia de la concentración de goma xantana, leche descremada, suero de leche, grasa vegetal y almidón lipofílico, en las propiedades físicas, texturales y estabilidad de emulsiones y cremas batidas.

Objetivo particular 1

Evaluar el efecto de la concentración de goma xantana en las propiedades físicas, texturales y estabilidad de emulsiones y cremas batidas, partiendo de una crema base con 20% de grasa vegetal, 8% almidón lipofílico y 5% de leche descremada.

Objetivo particular 2

Evaluar el efecto de la concentración de almidón lipofílico en las propiedades físicas, texturales y estabilidad de emulsiones y cremas batidas, partiendo de una crema base con 20% de grasa vegetal, 5% de leche descremada y 0.05% de goma xantana.

Objetivo particular 3

Evaluar el efecto de la concentración de leche descremada en las propiedades físicas, texturales y estabilidad de emulsiones y cremas batidas, partiendo de una crema base con 20% de grasa vegetal, 8% almidón lipofílico y 0.05% de goma xantana.

Objetivo particular 4

Evaluar el efecto de la concentración de grasa vegetal en las propiedades físicas, texturales y estabilidad de emulsiones y cremas batidas, partiendo de una crema base con 8% almidón lipofílico, 5% de leche descremada y 0.05% de goma xantana.

Objetivo particular 5

Evaluar el efecto de la concentración de concentrado de suero de leche (34% proteína) en las propiedades físicas, texturales y estabilidad de emulsiones y cremas batidas, partiendo de una crema base con 8% almidón lipofílico, 3% de leche descremada, 0.05% de goma xantana y 30% de grasa vegetal.

2.2 Diseño experimental

En el Cuadro 2 se muestra el diseño experimental que se aplicó a cada objetivo, así como los niveles de variación de cada componente.

Cuadro 2. *Tabla diseño experimental ANOVA de una sola vía.*

Objetivo	Goma xantana (%)	Almidón lipofílico (%)	Leche descremada (%)	Grasa vegetal (%)	Suero de leche (%)	Diseño experimental
1	0 0.05 0.1	8	5	20	0	ANOVA y prueba de Tukey
2	0.05	6 8 12	5	20	0	ANOVA y prueba de Tukey
3	0.05	8	5 7.5	20	0	ANOVA y prueba de Tukey
4	0.05	8	5	20 25 30	0	ANOVA y prueba de Tukey
5	0.05	8	3	30	3 5 7	ANOVA y prueba de Tukey

2.3 Materiales

En el Cuadro 3 se presenta la materia prima que se utilizó.

Cuadro 3. *Materiales.*

Material	Marca	Características
Almidón EMCAP (Almidón lipofílico)	Cargill de México	Soluble en agua fría. 8.5% de humedad.
Goma xantana	Keltrol	10.2% de humedad.
Leche descremada	Svelty	Con un contenido de grasa de 1.25%.
Grasa vegetal	Manteca Colon 5P	Aceite de palma RBD. Punto de fusión: 45 °C. Contenido de grasa sólida a 10 °C: 42%
Concentrado de suero de leche	Hegart de México	34% de proteína. 5.31% de humedad.

2.4 Elaboración de la emulsión base

Para la elaboración de las diferentes emulsiones, se siguió el método propuesto por Almonaci y col. (2013), el cual se ilustra en la Figura 18 y se describe a continuación.

Mezclado 1. Se pesaron los polvos y posteriormente se mezclaron a mano con una espátula de acero inoxidable dentro de un vaso de precipitado, hasta lograr una homogeneidad visual.

Dispersión de polvos. La mezcla de polvos se dispersó en agua, a una temperatura de 25 °C, utilizando un agitador de propelas marca IKA, modelo RW20 (E.U.A.) a una velocidad de 1000 rpm, se procuró agregarlos de manera continua y en una pequeña cantidad, para evitar una aglomeración que dificultara la correcta dispersión.

Fundido de la grasa. Se calentó la grasa para que llegara a una temperatura de 45 °C, utilizando una parrilla eléctrica marca Thermolyne, modelo Cimarec (E.U.A.) se agitó con una espátula cada cierto tiempo para que se encontrara totalmente líquida y poder homogeneizarla adecuadamente.

Homogeneizado. Se agregó la grasa a la dispersión de polvos manteniendo un hilo constante a una velocidad de 2300 rpm, por un tiempo de 3 minutos, utilizando un homogenizador marca Silverson, modelo L4R (E.U.A.).

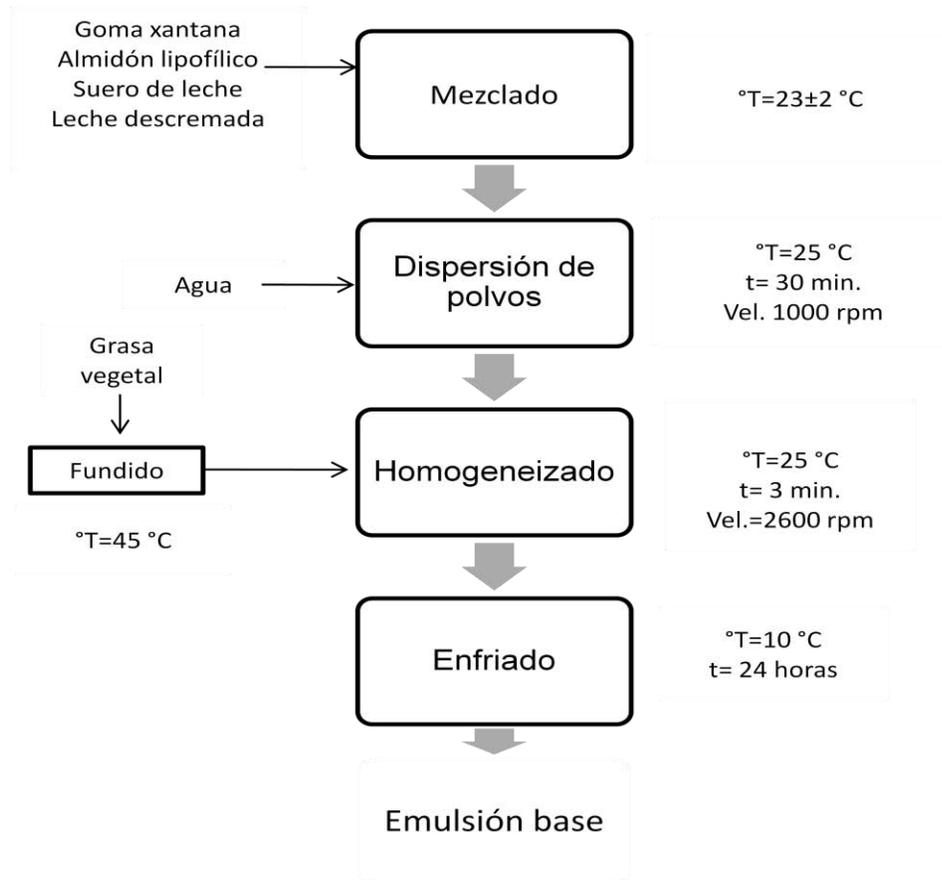


Figura 18. Diagrama de proceso para la obtención de la emulsión base. (Almonaci y col. 2013).

2.5 Elaboración de la crema batida

En la Figura 19 se puede observar el diagrama de proceso para la elaboración de la crema batida. La crema tuvo un reposo de 24 horas antes de batir, a una temperatura de 10 °C. Se utilizó una batidora marca Kitchen Aid, modelo K5SS (E.U.A.) (Figura 20), con batidor de globo. El recipiente en el que se batió la crema, estuvo a una temperatura cercana a los 10 °C para que se mantuviera la temperatura de la crema durante el batido y así se favoreciera la coalescencia parcial de la grasa. Primero se llevó a cabo un batido a una velocidad de 240 rpm con un tiempo de 3 minutos y posteriormente se aumentó la velocidad a 340 rpm.

El tiempo de batido para la elaboración de cada crema batida fue diferente debido a la composición de la emulsión base. Para cada formulación se realizó un batido preliminar para establecer el tiempo de batido, el cual se utilizó para las cremas batidas a las que se les hicieron las pruebas. El criterio visual aplicado para determinar el tiempo de batido en todos los casos, fue el de observar el desarrollo de la crema batida durante el proceso de batido, cuando esta comenzaba a verse más consistente, más firme y se le formaban huecos al paso del batidor, se detenía el proceso de batido, ya que si se continuaba batiendo, se producía la desestabilización (separación de líquido) del sistema.

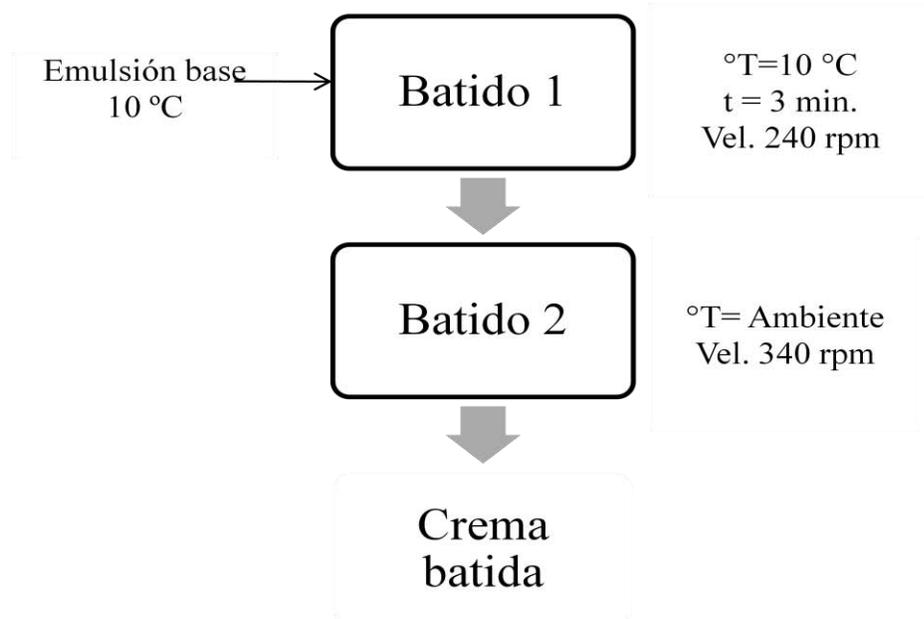


Figura 19. Diagrama de proceso para la elaboración de crema batida



Figura 20. Batidora Kitchen Aid con el batidor de globo.

Para poder hacer las réplicas del experimento, ya que las cremas batidas son poco estables y se les realizaron varias pruebas a cada una, se elaboraron en un mismo día 3 lotes diferentes de crema batida; a cada lote se le realizaron pruebas de rendimiento, densidad (triplicado), estabilidad por transmisión-retrodispersión de luz (triplicado) y adhesividad por penetración y retirada (triplicado).

2.6 Pruebas para la emulsión base

2.6.1 Tamaño de partícula

Se determinó el tamaño de partícula utilizando un granulómetro marca Cilas, modelo 920 (Francia) el cual tiene como principio la difracción de un rayo de luz láser. Con la ayuda de una pipeta graduada se colocaron aproximadamente cinco gotas de la emulsión base en el recipiente del instrumento el cual contiene agua, para obtener una oscuración (porcentaje o fracción de luz incidente debida a la difusión y a la adsorción de la luz por las partículas, este parámetro es usado para ajustar la cantidad necesaria de muestra para una correcta medición) en un intervalo del 10 al 15%; las pruebas se realizaron con y sin el uso de ultrasonido, para poder determinar la presencia de aglomerados en las emulsiones base.

Se hicieron tres réplicas por formulación. Al finalizar la prueba se obtuvo como resultado una distribución granulométrica de tamaño de partículas en base al volumen (Figura 21). Se obtuvieron además los diámetros medios de la muestra, así como los diámetros a los cuales se obtienen acumulados de 10, 50 y 90%.

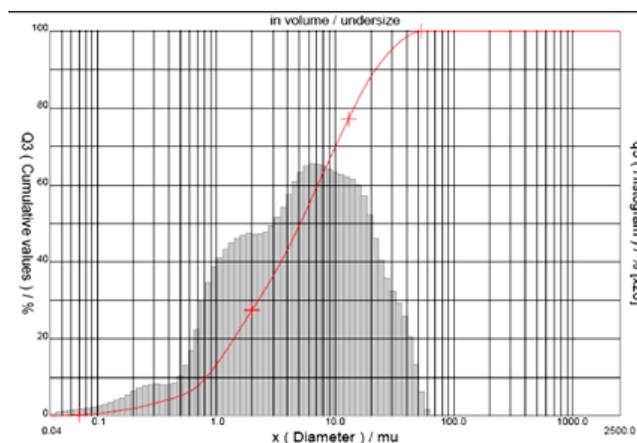


Figura 21. Curvas diferencial y acumulativa de la distribución de tamaño de partículas.

2.6.2 Comportamiento al flujo

La prueba se realizó en un viscosímetro de cilindros concéntricos marca Paar Physica, modelo MC1 (E.U.A.), utilizando las geometrías Z2 DIN para fluidas y Z3 DIN para muestras consistentes. La prueba consistió en realizar una curva de ascenso-descenso-ascenso, a velocidades de cizalla de 10-100 s⁻¹, a una temperatura de 10 °C, se hicieron tres réplicas por formulación. Se obtuvieron los datos de esfuerzo de cizalla (τ) en función de la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) del primer ascenso, para construir la curva de flujo (Figura 22) y la curva de viscosidad (η). La curva de esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla, se ajustó a alguno de los tres modelos siguientes. Donde, τ_0 es el esfuerzo inicial (Pa), κ es el índice de consistencia (Pa*sⁿ) y n el índice de comportamiento al flujo.

- Modelo Newtoniano. $\tau = \eta\dot{\gamma}$ **Ecuación 2**
- Modelo de la potencia $\tau = \kappa\dot{\gamma}^n$ **Ecuación 3**
- Modelo Herschel-Bulkley $\tau = \tau_0 + \kappa\dot{\gamma}^n$ **Ecuación 4**

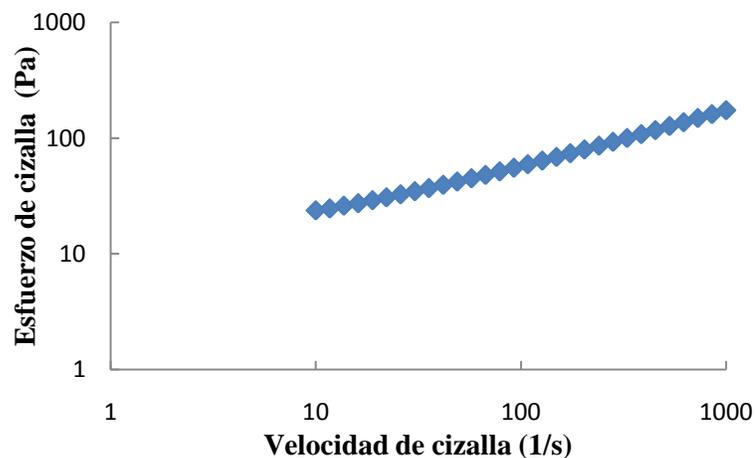


Figura 22. Ejemplo de una curva de flujo, donde se representa el esfuerzo en función de la velocidad de cizalla.

2.6.3 Estabilidad al clarificado por transmisión-retrodispersión de luz

Se utilizó el instrumento Turbiscan, marca Formulaction, modelo MA 2000 (Francia). Se colocó la crema vegetal en el tubo de vidrio de boro silicato, cuidando que el tapón de abajo tuviera el empaque. Se realizaron mediciones cada 24 horas hasta la total desestabilización

de la emulsión. Se hicieron tres réplicas por formulación. La Figura 23 muestra un ejemplo de una gráfica que se puede obtener de este instrumento, la cual muestra, el porcentaje de luz transmitida y retrodispersada en función de la longitud del tubo (Casas, 2013b).

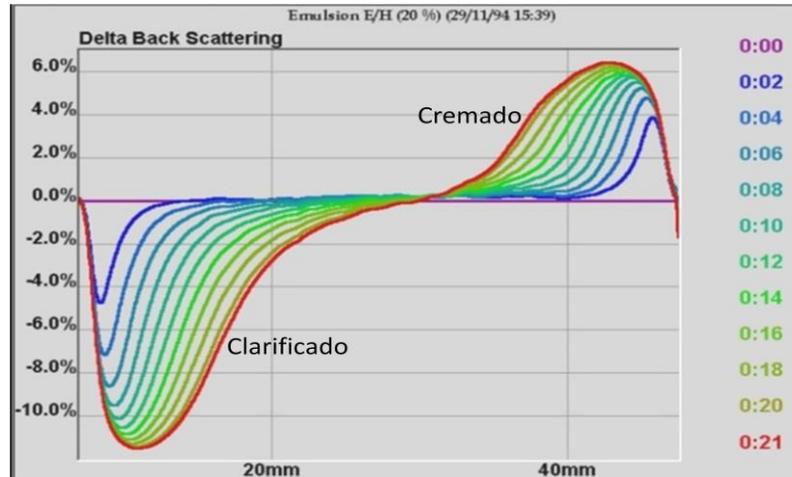


Figura 23. Ejemplo de una gráfica de retrodispersión en una emulsión mostrando los fenómenos de clarificación y cremado.

Posteriormente, se elaboró una cinética de espesor absoluto, la cual representa el cambio del espesor (ó altura) de fases formadas por clarificación, sedimentación o cremado en función del tiempo. Se colocaron las curvas en modo de referencia (se restan los resultados de la primera curva a las curvas siguientes, para poder comparar el comportamiento) y se identificaron picos de transmisión y/o retrodispersión a lo largo del tubo, mismos que se relacionan con los fenómenos de desestabilización observados en la muestra. Se eligieron los picos de retrodispersión o transmisión y se identificó la parte del tubo donde se localizan. Se seleccionaron los límites que se analizaron para cada pico por separado. Se graficó el espesor o altura de la zona en función del tiempo.

La Figura 24 representa un ejemplo de las curvas sigmoideas que se obtuvieron al tratar los datos con el programa Curve Expert versión Basic 1.4 (CurveExpert and GraphExpert Software). Se puede observar claramente la forma de “s” que toma la curva de desestabilización de la emulsión base y sobre ella la curva de ajuste al modelo sigmoideal. Los parámetros que se obtuvieron al ajustar al modelo sigmoideal son el espesor máximo, el cual nos da el mayor espesor que puede alcanzar el drenado de la emulsión base o la crema

batida; la sigmoidalidad, es que tanto tiene forma de "s" la cinética a evaluar y finalmente el tiempo medio, es el tiempo que tarda en drenar la mitad del volumen máximo.

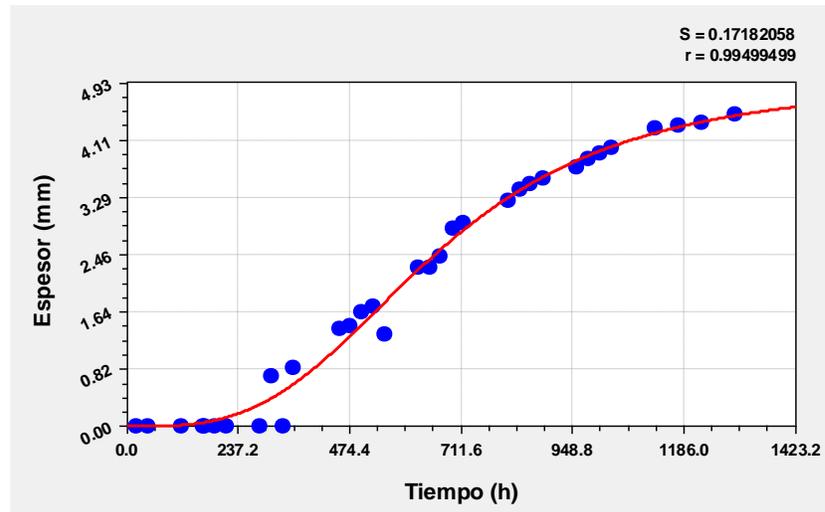


Figura 24. Ejemplo de una curva de espesor absoluto ajustada al modelo sigmoide.

A continuación se presenta el modelo sigmoide (Casas, 2013b; Raharitsifa y col. 2006).

$$y = \frac{a \cdot x^b}{(c^b + x^b)} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde:

a: espesor máximo (mm)

b: comportamiento sigmoide.

c: tiempo necesario para alcanzar la mitad del espesor máximo (h)

2.7 Pruebas para la crema batida

2.7.1 Rendimiento

En relación a la formación de espumas, se describe el rendimiento como la cantidad de aire incorporado. Esto es, la proporción gas-líquido del producto aireado, expresada en porcentaje volumétrico. Se adhirió cinta adhesiva a la pared interna del recipiente donde se batió la crema, se colocó una marca señalando la altura inicial de la emulsión base en el recipiente, una vez finalizado el batido, se colocó una marca sobre la cinta adhesiva señalando la altura final de la crema batida. Se midió el volumen inicial de la crema

agregando agua hasta llegar a la marca y después se midió la cantidad de agua agregada con ayuda de una probeta graduada de 250 ml. Se hizo lo mismo pero ahora con la marca de la crema batida, se realizaron tres réplicas por formulación.

Posteriormente se sustituyeron los volúmenes en la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\text{Volumen final} - \text{Volumen inicial}}{\text{Volumen inicial}} * 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Re = rendimiento

2.7.2 Densidad

Se basa en la relación de una cantidad conocida de masa contenida sobre cierto volumen. Se utilizaron cajas de petri de 5 cm de diámetro a las cuales se les midió el diámetro interno y la altura con un vernier digital, marca Mitutoyo, con lo cual se calculó su volumen. Se tomó el peso de la caja petri vacía utilizando una balanza analítica marca Ohaus. Se llenó la caja petri con la crema batida al ras y se pesó, por diferencia se obtuvo el peso de la muestra sola. Se realizaron tres repeticiones por formulación a 25 ± 2 °C.

Se sustituyeron los datos en las siguientes ecuaciones.

$$g \text{ de espuma} = (g \text{ de caja Petri llena} - g \text{ de caja Petri vacía}) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\rho = \frac{\text{masa de la espuma}}{\text{volumen de la caja Petri}} [=] \frac{g}{mL} \quad \text{Ecuación 8}$$

2.7.3 Tamaño de burbuja

Se utilizó un microscopio óptico marca Olympus, modelo CX31 (Japón). Se colocó una pequeña muestra en el portaobjetos, el cual tiene una curvatura especial para evitar que las burbujas se rompan, se utilizó el objetivo 4x, se ajustó la intensidad de la luz de manera que en la pantalla de la computadora se viera una imagen clara y se capturó la misma con la cámara, fueron de diferentes lados del portaobjetos. Se tomó el diámetro de treinta diferentes burbujas, con el programa Image-Pro Discovery versión 4.5, de Media Cybernetics.

2.7.4 Propiedades texturales

2.7.4.1 Adhesividad, por penetración y retirada

Se utilizó el texturómetro modelo TA-XT2, marca Stable Micro Systems (E.U.A.) con una celda de carga de 25 kg. La muestra se colocó en una caja petri de 5 cm de diámetro, la cual se llenó al ras. Se utilizó un cilindro de 1 pulgada de diámetro penetrando el 50% de la altura de la muestra, la cual era de 10 cm, a una velocidad de 2 mm/s con una fuerza de contacto de 5g. Se retiró el dispositivo a velocidad de 10 mm/s a una altura suficiente para que el hilo de la muestra se rompa. La prueba se realizó a 25 ± 2 °C.

La Figura 25 muestra un ejemplo de curva fuerza-tiempo, de donde se obtuvieron los siguientes parámetros (Casas, 2013c): consistencia (fuerza máxima que se necesita para penetrar en el alimento), fuerza adhesiva (fuerza máxima durante la retirada), adhesividad (área negativa de la curva), estiramiento (distancia entre el inicio de la curva de retirada y el momento en que la fuerza cae a cero o un valor constante) y untabilidad (estiramiento entre la fuerza adhesiva).

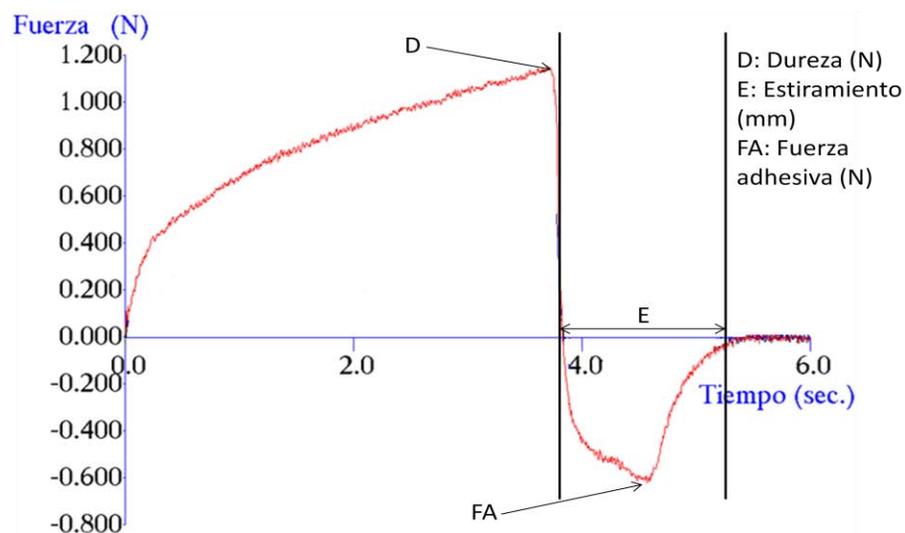


Figura 25. Ejemplo de una curva de adhesividad por penetración y retirada.

2.7.4.2 Extrusión positiva

La muestra se colocó en una celda de extrusión positiva hasta la mitad de su altura, en cuya base se situó un disco con un orificio central de 3 mm diámetro. La muestra se comprimió

con una placa de 3.5 cm que la obligó a salir por el orificio. Se utilizó una velocidad de acercamiento y de prueba de 1 mm/s, una fuerza de contacto de 5 g, una velocidad de retirada de 10 mm/s, se acercó la placa casi al ras de la muestra y se comprimió 30 mm.

Se obtuvo una gráfica (Figura 26), de la cual se calculan los parámetros: resistencia a la extrusión (pendiente inicial de 2-3 en la Figura 26, indica que tan resistente es el material a ser extruido), fuerza de extrusión (fuerza promedio de 4-5 en la Figura 26, que se aplica para hacer fluir el material a través del orificio) y trabajo de extrusión (área bajo la curva, Figura 26). La fuerza máxima requerida para completar la extrusión del material y el área bajo la curva fuerza-distancia (trabajo) se miden como índices de textura de la muestra (Casas, 2013c).

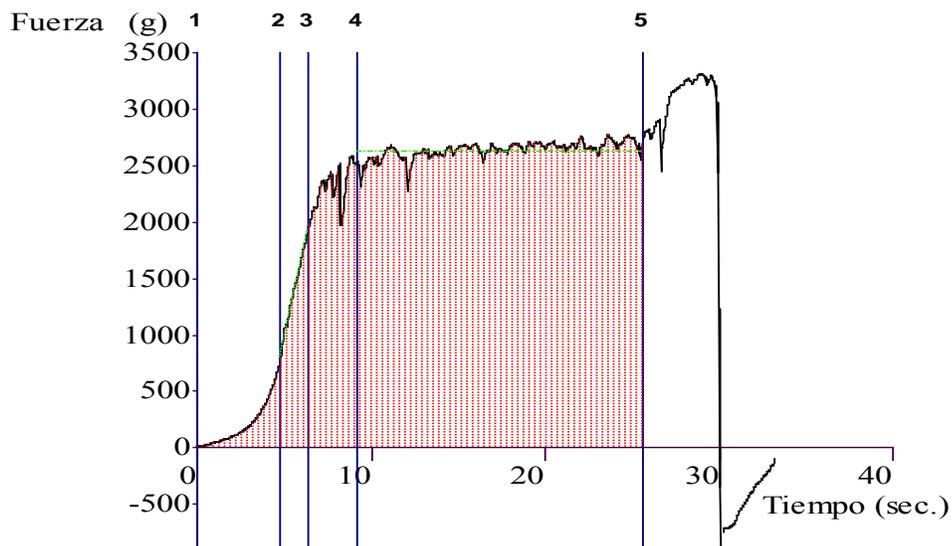


Figura 26. Ejemplo de una gráfica de extrusión positiva

2.7.5 Estabilidad por transmisión-retrodispersión de luz

Se utilizó de igual manera el Turbiscan marca Formulaction, modelo MA 2000 (Francia). El principio es el mismo que el de la emulsión base, la diferencia radica en la frecuencia de escaneado, ya que la crema batida fue más inestable, por lo que se escaneó durante dos horas cada 3 minutos, también se elaboraron las cinéticas de clarificado.

CAPÍTULO III.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Objetivo particular 1

3.1.1 Emulsión base. Efecto de la concentración de goma xantana

3.1.1.1 Comportamiento al flujo

En la figura 27 se muestra un ejemplo del comportamiento reológico que presentaron las emulsiones base, se observa que en el primer segmento de ascenso (A1) de velocidad de cizalla ($10-100 \text{ s}^{-1}$), la viscosidad permaneció constante demostrando un comportamiento newtoniano en la emulsión base con 0.05% de goma xantana y la que contenía 6% de almidón lipofílico o un comportamiento adelgazante a la cizalla en el resto de las emulsiones; en el segundo segmento (descenso de la velocidad de cizalla, D), la curva regresó por arriba del ascenso 1 y en su segundo ascenso (A2) la viscosidad de igual manera estuvo muy por encima del primer ascenso. La Figura 27 ilustra este comportamiento para una emulsión base con 0.05% goma xantana. Todas las emulsiones base analizadas mostraron este comportamiento inusual para una emulsión, el cual se puede atribuir a la desestabilización por coalescencia parcial provocada por la cizalla a $10 \text{ }^\circ\text{C}$, debido a esto, solamente se consideró el primer segmento de ascenso, para todas las emulsiones base evitando someter las emulsiones base a un cizallamiento excesivo que diera lugar a una mayor desestabilización (Márquez y col., 2005).

La Figura 28 muestra las curvas de flujo de las emulsiones a diferentes concentraciones de goma xantana (GX) se puede observar que la emulsión base con 0.1% de goma xantana fue la que requirió un mayor esfuerzo de cizalla, debido al aumento en la concentración de la goma, ya que ésta reduce la movilidad de la fase continua, mientras que en los otros dos casos, la influencia de la concentración no fue tan notoria, puesto que las curvas se superponen y tienen un comportamiento similar. Lo mismo sucede con la curva de viscosidad (Figura 29), las emulsiones con 0% y 0.05% de goma xantana, su viscosidad fue muy similar.

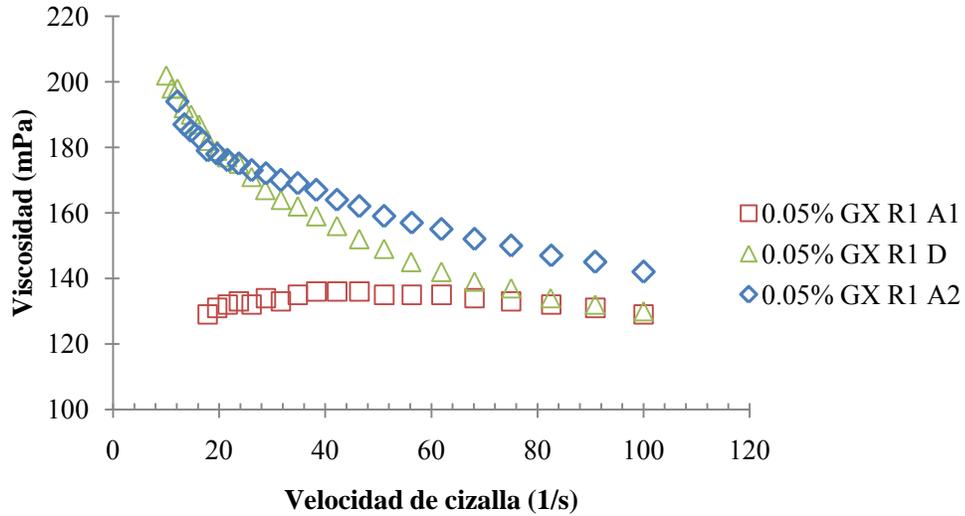


Figura 27. Curva de viscosidad obtenida en los diferentes intervalos de velocidad de cizalla para la emulsión base con goma xantana (GX) al 0.05%, A1 primer ascenso, D descenso y A2 segundo ascenso.

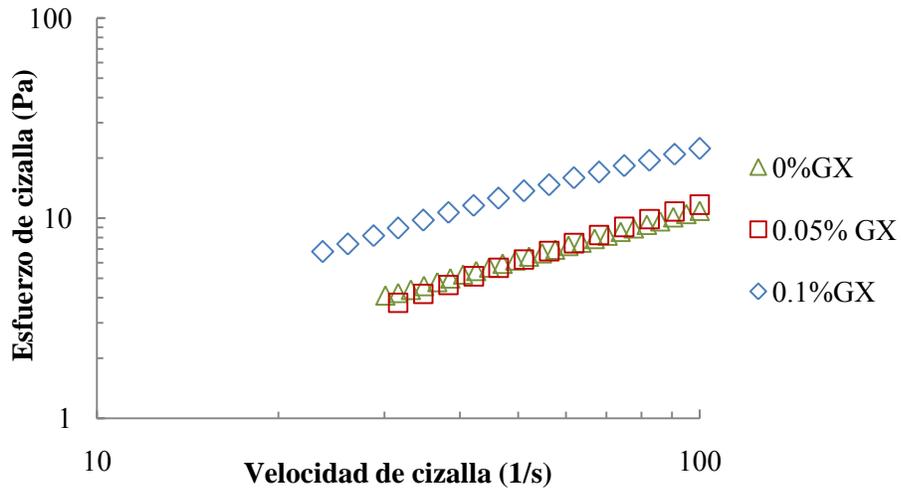


Figura 28. Curva de flujo de las emulsiones base con diferentes concentraciones de goma xantana.

El Cuadro 4 muestra los parámetros reológicos que se obtuvieron de las 3 concentraciones de goma xantana en la emulsión base, en el caso de la emulsión con 0.05% de goma xantana, el comportamiento que mostró fue de un fluido newtoniano, es decir que su viscosidad no se vió influenciada por la cizalla, mientras que para las concentraciones de 0% y 0.1%, la emulsión base tomó el comportamiento de un fluido de la potencia. El comportamiento a 0.1% se debió a que la goma xantana es un agente espesante con carácter

adelgazante a la cizalla, por lo que al aumentar su concentración, se aumenta la viscosidad de la emulsión base y se vuelve adelgazante a la cizalla. Contrario a lo esperado, la concentración de 0% tuvo un comportamiento adelgazante a la cizalla, en vez de ser un fluido newtoniano, se puede atribuir a que la emulsión presentó floculación, lo que aumenta la viscosidad del sistema, esto se puede comprobar ya que también presentó un tamaño de partícula mayor (Cuadro 6). Las concentraciones de 0% y 0.1% tuvieron un índice de comportamiento al flujo (n) similar, por otro lado el índice de consistencia (k) de 0.1% (0.52 Pa s^n) fue el doble que el de 0% (0.26 Pa s^n).

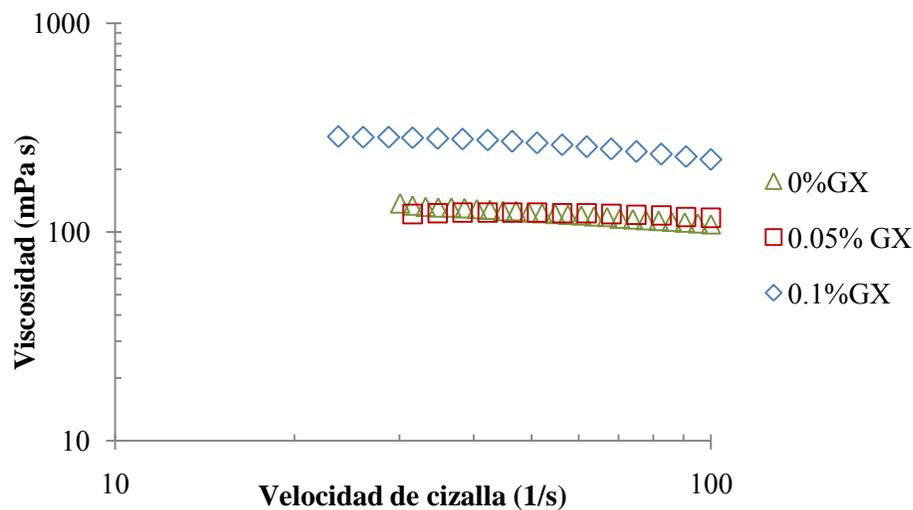


Figura 29. Curva de viscosidad de la emulsión base con diferentes concentraciones de goma xantana (GX).

Cuadro 4. Parámetros reológicos de las emulsiones base con diferentes concentraciones de goma xantana.

Concentración de xantana (%)	Potencia					Newtoniano		
	n	C. V. (%)	k (Pa s^n)	C. V. (%)	R^2	Viscosidad (mPa s)	C. V. (%)	R^2
0	0.81	0.86	0.26	9.03	0.999	-	-	-
0.05	-	-	-	-	-	120	4.30	0.999
0.1	0.82	2.52	0.52	1.35	0.996	-	-	-

Debido a que las emulsiones base tuvieron comportamientos reológicos diferentes y para que los datos del Cuadro 4, se pudieran comparar estadísticamente utilizando un análisis ANOVA de una vía, se seleccionaron las viscosidades de cada emulsión base a la velocidad de cizalla inicial y a la máxima velocidad de cizalla, 30 s^{-1} y 100 s^{-1} respectivamente (Cuadro 5), éstas viscosidades se pueden comparar debido a que no tienen ningún tipo de tratamiento, son las que proporciona el instrumento. Después de analizarlos se comprobó que las concentraciones de 0% y 0.05% de goma xantana, eran estadísticamente iguales, por lo que la concentración que tuvo influencia en la viscosidad fue la de 0.1%, debido al carácter espesante de la goma xantana.

Cuadro 5. *Viscosidades a dos velocidades de cizalla de las emulsiones base a diferentes concentraciones de goma xantana.*

Concentración de xantana (%)	η_{30} (mPa s)	η_{100} (mPa s)
0	139.67 ^a	112.67 ^a
0.05	120 ^a	120 ^a
0.1	279.67 ^b	223.00 ^b

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.1.1.2 Tamaño de partícula

En la Figura 30 se presenta la distribución del tamaño de partícula para cada concentración de goma xantana, la concentración de 0% mostró una bimodalidad que no desaparece con la aplicación de ultrasonido, su punto más alto se encontró a una densidad de distribución de 6% con un tamaño de partícula de $10 \mu\text{m}$, el uso de ultrasonido no tuvo efecto sobre el tamaño de partícula. En el caso de 0.05% el punto más alto, se encuentra a una densidad de 6% y un tamaño de partícula de $6 \mu\text{m}$, de igual manera el uso de ultrasonido no causó cambios en el tamaño de partícula. Para la concentración de 0.1% el uso de ultrasonido representó una disminución del tamaño de partícula, se puede ver un leve desplazamiento de la curva hacia tamaños más pequeños, y un aumento en la densidad de distribución, aproximadamente al tamaño de $4 \mu\text{m}$.

El Cuadro 6 muestra los tamaños de partícula que se acumularon el 10, 50 y 90% de la población (estos tres valores dan aproximaciones de los tamaños de partícula pequeños, intermedios y más grandes respectivamente, contenidos en la muestra), así como los diámetros promedio de partículas que se obtuvieron en las emulsiones base al variar la concentración de xantana. Los acumulados muestran que el tamaño osciló entre 2 y 13 μm . La aplicación de ultrasonido disminuyó muy ligeramente el diámetro, mostrando poca tendencia a la formación de agregados, el uso de ultrasonido fue un poco más notorio con la concentración de 0.1%.

El diámetro promedio con ultrasonido, disminuyó al aumentar la concentración de goma xantana. El análisis estadístico mostró que la xantana si tuvo una influencia significativa en el tamaño de partícula de la emulsión. Ye y col. (2004), reportaron que el tamaño de partícula disminuye conforme aumenta la concentración de goma xantana en emulsiones formadas con proteínas de suero de leche hidrolizadas.

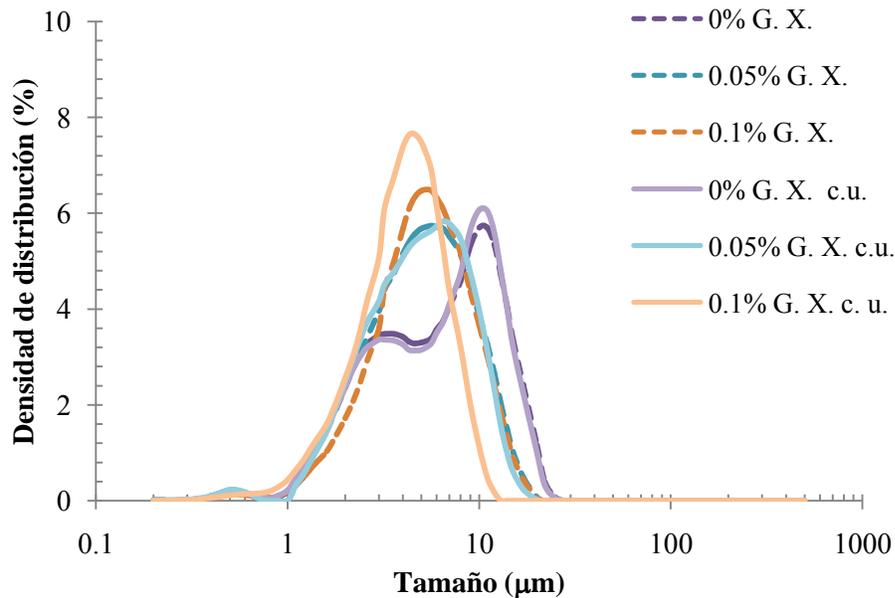


Figura 30. Distribución del tamaño de partícula con ultrasonido (c.u.) y sin el uso de ultrasonido, para las diferentes concentraciones de goma xantana (GX).

Cuadro 6. *Tamaño de burbuja para la crema batida con diferentes concentraciones de goma xantana.*

Concentración de xantana (%)	Ultrasonido	10% acumulado (µm)	50% acumulado (µm)	90% acumulado (µm)	Diámetro promedio (µm)
0	Sin	1.91	7.76	13.35	6.97
	Con	1.88	6.26	13.11	6.93^a
	C. V. (%)	0.31	0.46	0.62	0.42
0.05	Sin	1.98	4.79	10.03	5.47
	Con	1.92	4.68	9.58	5.28^b
	C. V. (%)	0.60	0.25	0.21	0.22
0.1	Sin	2.15	4.89	9.83	5.51
	Con	1.76	3.89	6.88	4.16^c
	C. V. (%)	0.98	1.29	0.91	0.64

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales. El C.V. es para las muestras con ultrasonido.

3.1.1.3 Estabilidad por retrodispersión-transmisión de luz

En la Figura 31 se presenta un ejemplo de las gráficas de trasmisión y retrodispersión en función de la altura del tubo; en todas las emulsiones base analizadas se presentaron ambos fenómenos (transmisión y retrodispersión). Se observa que en la parte baja del tubo disminuyó la retrodispersión y se incrementó la trasmisión, fenómenos indicativos de la separación de líquido de la fase continua (clarificación). La altura o espesor de clarificado se incrementó con el tiempo, siguiendo una cinética de tipo sigmoideal, la cual se ajustó al modelo propuesto por Raharitsifa y col. (2006).

En la Figura 32 se muestran las cinéticas de incremento de espesor de clarificado para las emulsiones base con las tres concentraciones de xantana. Se observa que las emulsiones base más estables fueron las que tienen las concentraciones de 0% y 0.1% de goma xantana, mientras que la concentración de 0.05% fue la menos estable, ya que se obtuvo una pendiente más pronunciada que en las otras dos concentraciones, esto quiere decir que en un menor tiempo se alcanzó un mayor espesor de clarificado.

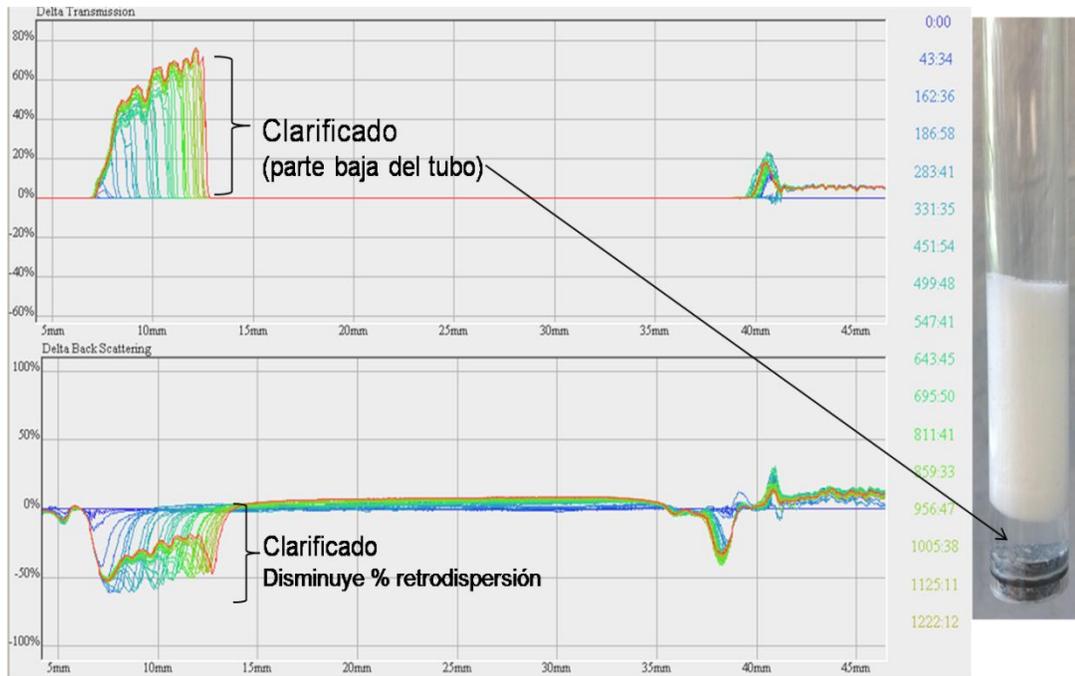


Figura 31. Gráfica de transmisión-retrodispersión de la emulsión base con 0.05% de goma xantana.

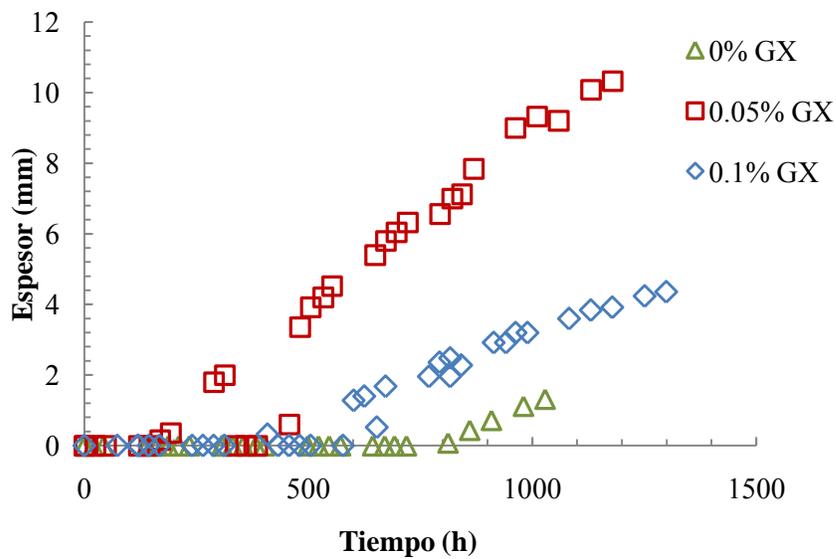


Figura 32. Cinéticas de espesor absoluto de clarificado de las emulsiones base con diferentes concentraciones de goma xantana (GX).

En el Cuadro 7 se muestran los parámetros del modelo sigmoideal para las diferentes concentraciones de goma xantana, que al ser analizados estadísticamente, se obtuvo que la concentración de xantana tiene un efecto significativo en la estabilidad de la emulsión base.

Cuadro 7. *Parámetros del modelo sigmoideal de las emulsiones base con diferentes concentraciones de goma xantana.*

Concentración de xantana (%)	Espesor máx. (mm)		Sigmoidealidad		Tiempo medio (h)	
	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)
0	1.30 ^a	11.05	24.61	29.75	931.32 ^a	3.89
0.05	10.64 ^b	14.81	3.84	18.35	674.52 ^b	4.46
0.1	4.54 ^c	3.11	6.56	33.04	815.92 ^{ab}	11.49

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

Un menor espesor y/o un mayor tiempo corresponden a la emulsión más estable, en este caso fue la que no tenía xantana, la menos estable fue la emulsión base con 0.05% ya que fue la que tuvo un mayor clarificado en un menor tiempo. En la emulsión base sin xantana, el almidón lipofílico produjo una emulsión más estable debido a su naturaleza anfifílica y a la ausencia de otros componentes como la goma xantana, lo que disminuye la competencia por la interfase, reduciendo los diferentes fenómenos de desestabilización. Estos resultados afectaron notablemente a la crema batida como se verá más adelante.

3.1.2 Crema batida. Efecto de la concentración de goma xantana.

3.1.2.1 Tiempo de batido y rendimiento

En el Cuadro 8 se muestra el rendimiento obtenido con los tres niveles de concentración de goma xantana; sin xantana y con 0.05% se tuvo un rendimiento similar, cercano al 50%. La crema batida con menor rendimiento fue la de 0.1%, esto puede deberse a que fue la emulsión base con mayor viscosidad, lo que redujo la movilidad de los glóbulos de grasa y por lo tanto disminuyó la coalescencia parcial. El tiempo necesario para obtener este rendimiento estuvo entre 27 y 29 minutos, recordando que el tiempo de batido se estableció con el criterio mencionado en materiales y métodos. La emulsión base más inestable (0.05%

de xantana) presentó un rendimiento ligeramente mayor, aún cuando fue estadísticamente igual a la crema sin xantana, que fue la emulsión base más estable.

Las cremas batidas presentaron bajos rendimientos, pues de acuerdo con Kim y col. (2013) las cremas batidas teóricamente deben tener rendimientos entre 100 y 300%; por otro lado Jakubczyc y Niranjana (2006), reportaron rendimientos experimentales de 50 a 100%, pero a tiempos de batido entre 3 y 12 min.

Cuadro 8. *Tiempo de batido y rendimiento de la crema batida con diferentes concentraciones de goma xantana.*

Concentración de xantana (%)	Tiempo de batido (min)	Rendimiento (%)	C. V (%)
0%	29	47.46 ^a	2.43
0.05%	29	48.27 ^a	2.38
0.1%	27	37.11 ^b	1.62

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.1.2.2 Densidad

El Cuadro 9 muestra la densidad obtenida para la crema batida con diferentes concentraciones de goma xantana, el análisis estadístico mostró que en los resultados de las tres concentraciones no existió diferencia significativa.

Cuadro 9. *Densidad de la crema batida con diferentes concentraciones de goma xantana.*

Concentración de xantana (%)	Densidad (g/cm³)	C. V. (%)
0%	0.63 ^a	0.41
0.05%	0.61 ^a	1.21
0.1%	0.61 ^a	2.32

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.1.2.3 Tamaño de burbuja

En el Cuadro 10 se observa que el aumento en la concentración de goma xantana disminuyó el diámetro promedio de las burbujas de la crema batida, las emulsiones base más inestables dieron lugar a cremas batidas con tamaños de burbuja más pequeños, a tiempos de batido similares, confirmando que una emulsión base más inestable es más fácil de batir. Los C. V. altos no implican que los resultados no sean confiables, ya que si este fuera el caso no se hubiera podido realizar la prueba de Tukey (prueba rangos múltiples), por lo que se puede concluir que sí existe una diferencia significativa entre los valores de las tres concentraciones de goma xantana. El tamaño de burbuja disminuyó, debido al aumento en la viscosidad de la fase continua, pues la incorporación de aire al sistema se hacía de una forma más homogénea.

Cuadro 10. *Diámetro promedio de burbuja para la crema batida con diferentes concentraciones de goma xantana.*

Concentración de xantana (%)	Intervalo de diámetros de burbuja (μm)	Diámetro promedio (μm)	C. V. (%)
0	118.70 – 222.27	136.32 ^a	25.50
0.05	51.61 – 96.41	78.20 ^b	20.02
0.1	40.15 – 98.92	58.81 ^c	27.12

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

Jakubczyc y Niranjana (2006) han reportado tamaños de burbuja que van desde los 0.8 μm a los 144 μm , a un tiempo de batido de 12 minutos, en cremas batidas lácteas comerciales, con 35% de grasa láctea. Los resultados de tamaño de burbuja obtenidos se encuentran dentro de este intervalo. Los altos coeficientes de variación se deben a que la crema batida es una muestra heterogénea, que se desestabiliza rápido debido a la manipulación, por lo que las burbujas de aire chocan unas con otras aumentando su tamaño, este fenómeno se conoce como maduración de Ostwald (Dutta y col., 2004).

3.1.2.4 Propiedades texturales

De acuerdo con la Figura 33 y el Cuadro 11, se puede concluir que la crema con una menor consistencia fue la de 0% de goma xantana, mientras que en las cremas con concentraciones de 0.05% y 0.1% de goma xantana no existió diferencia; el aumento de la consistencia se debió a la presencia de la goma xantana en el sistema.

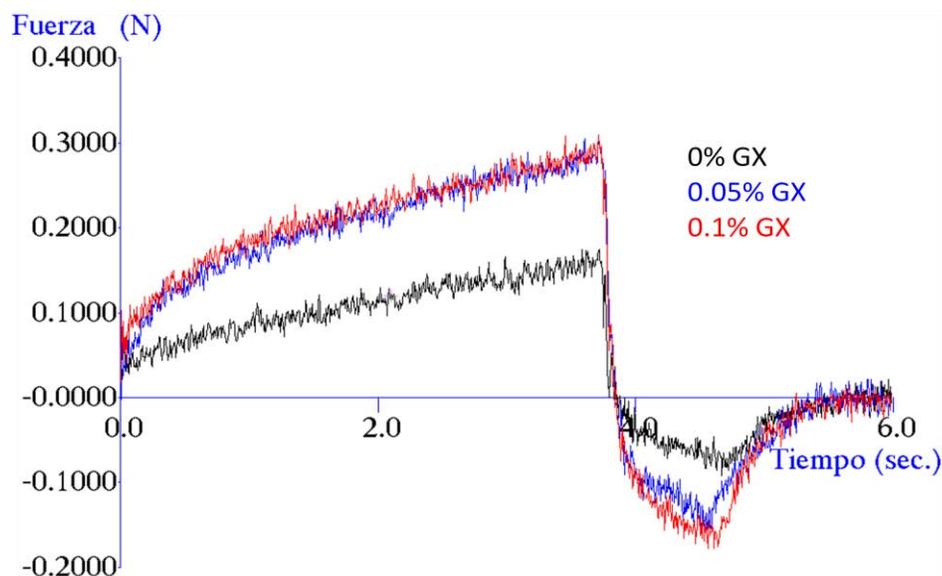


Figura 33. Curvas de adhesividad para crema batida con diferentes concentraciones de goma xantana (GX).

Al agregar goma xantana a la formulación, la fuerza adhesiva así como la adhesividad aumentaron, debido a que la goma xantana aumenta la viscosidad del sistema; sin embargo, al incrementar la concentración de goma xantana no existieron diferencias significativas. El estiramiento no tuvo cambios, así como la untabilidad, esto debido al aumento en la consistencia, ya que se necesitó más fuerza para poder extender la crema batida (Cuadro 11).

Cuadro 11. *Parámetros obtenidos en la prueba de adhesividad para crema batida con diferentes concentraciones de goma xantana.*

Concentración de xantana (%)	Consistencia (N)		Fuerza adhesiva (N)		Estiramiento (mm)		Adhesividad (N*s)		Untabilidad (mm/N)	
	Prom.	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)
0%	0.18 ^a	7.6	-0.10 ^a	10.3	17.70 ^a	1.6	-0.08 ^a	9.3	-176 ^a	10.9
0.05%	0.30 ^b	6.3	-0.16 ^b	4.8	17.60 ^a	0.5	-0.12 ^b	7.0	-112 ^b	5.0
0.1%	0.31 ^b	2.5	-0.18 ^b	0.56	17.57 ^a	0.4	-0.15 ^b	2.9	-98.2 ^b	0.6

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.1.2.5 Estabilidad. Por retrodispersión-transmisión de luz

La estabilidad de la crema batida es dependiente del tiempo de batido, del tipo de estructuras formadas y de su rigidez. Un tiempo largo de batido puede originar un colapso de la espuma debido al daño infringido a la interfase, la cual soporta las burbujas de aire en la matriz (Jakubczyc y Niranján, 2006).

La Figura 34 muestra un ejemplo de la curva de retrodispersión en modo de referencia (ver Anexo 1), para la crema batida sin goma xantana; el hecho de que sólo se muestren datos en retrodispersión se debe a que el líquido drenado era opaco lo que no permitió el paso del haz de luz, por lo tanto éste se retrodispersaba en la muestra en menor grado que en el cuerpo de la crema batida. El lado izquierdo de la Figura 34 muestra la parte inferior del tubo donde se observa la disminución de la retrodispersión y el aumento del ancho del pico con respecto al tiempo, lo que implica un aumento en el tamaño de burbuja y un posterior drenado de líquido (clarificado) de la crema batida, mientras que en la parte media del tubo sólo se observa el aumento del tamaño de las burbujas.

La Figura 35 muestra las cinéticas de espesor absoluto en la zona de clarificado de líquido en la parte de retrodispersión. La cinética de espesor absoluto nos representa la altura que alcanza el líquido drenado de la crema batida en función del tiempo. Se observa que el espesor más alto se obtuvo para la mayor concentración de goma xantana, esto también se

puede verificar en el Cuadro 12. A las concentraciones de 0% y 0.05% la goma xantana no tuvo influencia significativa, pero si al aumentar la concentración a 0.1%, de acuerdo al análisis estadístico. En cuanto al tiempo requerido para drenar la mitad del máximo espesor osciló entre 0.47 y 0.66 h, el análisis estadístico mostró que no hubo una diferencia significativa. Los resultados ubican a la crema batida con 0.1% de xantana como la más inestable y a las cremas con 0% y 0.05% con una estabilidad similar.

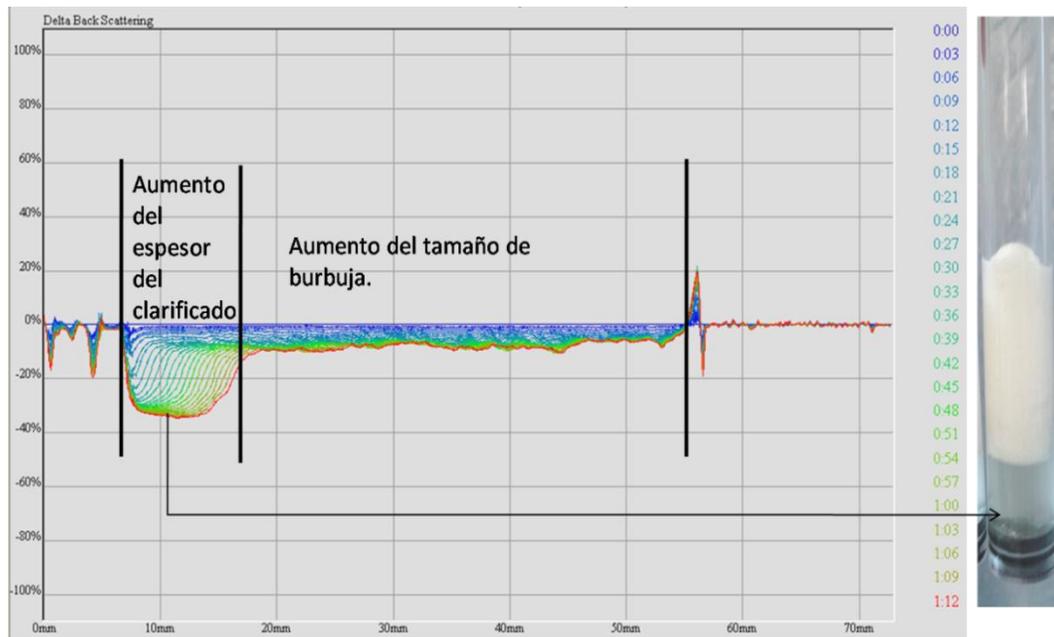


Figura 34. Curva de retrodispersión en modo referencia de la emulsión sin goma xantana.

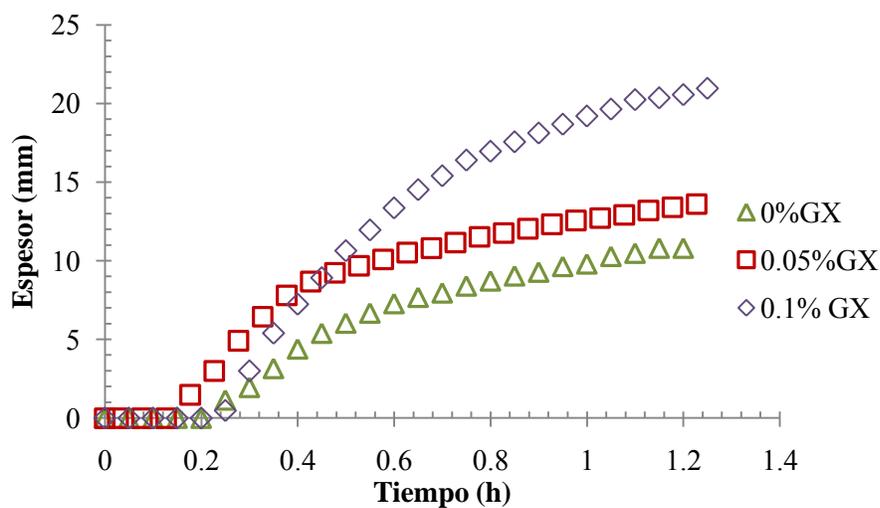


Figura 35. Cinéticas de espesor absoluto de clarificado para las cremas batidas, a diferentes concentraciones de goma xantana (GX).

Cuadro 12. *Parámetros del modelo sigmoidal para el drenado de la crema batida con diferentes concentraciones de goma xantana.*

Concentración de xantana (%)	Espesor máx. (mm)		Sigmoidalidad		Tiempo medio (h)	
	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)
0	11.70 ^a	5.58	2.89	0.10	0.66 ^a	36.03
0.05	11.12 ^a	31.32	2.56	1.79	0.47 ^a	31.74
0.1	23.66 ^b	8.65	2.86	9.64	0.52 ^a	3.48

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

Se decidió utilizar la concentración de 0.05% de goma xantana en los demás objetivos, al ser la emulsión base menos estable, ya que esto facilita su batido y para tomar un valor medio de la concentración de goma xantana. También por ser la crema batida que mejores resultados dio, pues aunque tuvo valores de consistencia iguales a los de la concentración de 0.1%, resultó ser la de mayor rendimiento y estabilidad similar a la crema sin xantana y mayor que para la crema batida con 0.1% de xantana.

3.2 Objetivo particular 2

3.2.1 Emulsión base. Efecto de la concentración de almidón lipofílico

3.2.1.1 Comportamiento al flujo

La Figura 36 muestra la curva de flujo para las concentraciones de almidón lipofílico; se puede observar que la emulsión base con 12% de almidón lipofílico requirió un mayor esfuerzo de cizalla para fluir, mientras que para 6% y 8% la influencia de la concentración fue mínima, pues tuvieron un comportamiento similar. Lo mismo sucedió con la viscosidad (Figura 37), para las concentraciones de 6% y 8% ésta fue casi constante durante todo el intervalo, en el caso de la emulsión con 12% de almidón lipofílico, esta tuvo una mayor viscosidad, la cual disminuyó conforme aumentó la velocidad de cizalla, demostrando un comportamiento adelgazante a la cizalla. Debido a que el almidón OSA tiene una estructura

macromolecular, el aumento en su concentración causó un aumento en la viscosidad de la fase acuosa que disminuyó la movilidad de los glóbulos de grasa (Dokic y col., 2012).

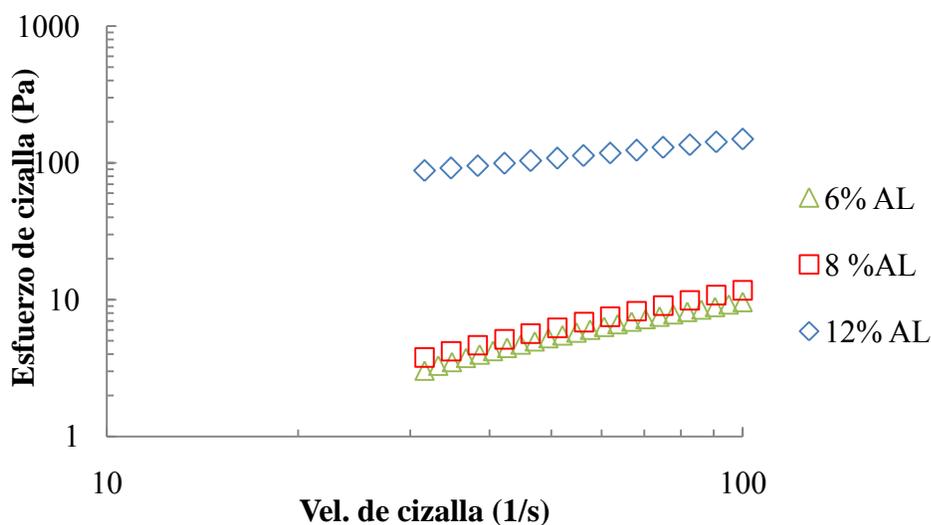


Figura 36. Curva de flujo de emulsiones con diferentes concentraciones de almidón lipofílico (AL).

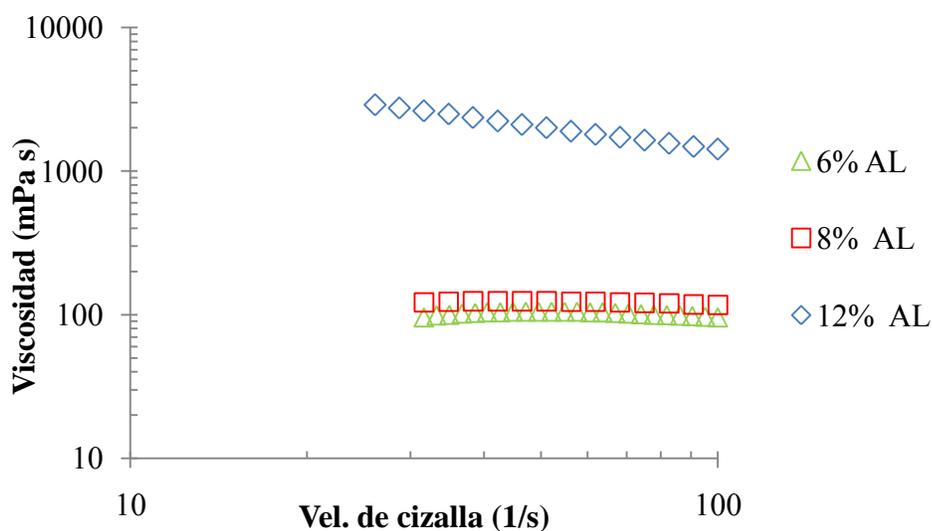


Figura 37. Curva de viscosidad para la emulsión con diferentes concentraciones de almidón lipofílico (AL).

El Cuadro 13 muestra los parámetros reológicos que se obtuvieron de las 3 concentraciones de almidón lipofílico en la emulsión base. En el caso de las emulsiones de 6% y 8% de almidón lipofílico, el comportamiento que mostraron fue de un fluido Newtoniano, es decir, que su viscosidad no se vio influenciada por la cizalla, mientras que al aumentar la

concentración de almidón lipofílico a 12%, la emulsión base tomó el comportamiento de un fluido Herschel-Bukley, ya que necesita un esfuerzo inicial para fluir y es adelgazante a la cizalla; Dokic y col. (2012) encontraron resultados similares en emulsiones aceite en agua, estabilizadas con almidón lipofílico.

Cuadro 13. *Parámetros reológicos de las emulsiones base con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.*

Concentración de almidón lipofílico (%)	Herschel-Bukley						Newtoniano		
	σ_0 (Pa)	n	C. V. (%)	k (Pa s ⁿ)	C. V. (%)	R ²	η (mPa s)	C. V. (%)	R ²
6%	-	-	-	-	-	-	100	4.47	0.995
8%	-	-	-	-	-	-	120	4.29	0.999
12%	33	0.68	5.14	5.5	11.5	0.998	-	-	-

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

Como se mencionó anteriormente los datos del Cuadro 13 no pueden ser estadísticamente comparables, por lo tanto se seleccionaron las viscosidades de cada emulsión base a la velocidad de cizalla inicial y a la velocidad de cizalla más alta, $30s^{-1}$ y $100s^{-1}$ respectivamente (Cuadro 14). El análisis estadístico mostró que no hay diferencia significativa entre 6 y 8% de almidón lipofílico y que con 12%, la viscosidad a ambas velocidades es mayor.

Cuadro 14. *Viscosidades a dos velocidades de cizalla de las emulsiones base a diferentes concentraciones de almidón lipofílico.*

Concentración de almidón lipofílico (%)	η_{30} (mPa s)	η_{100} (mPa s)
6	100 ^a	100 ^a
8	120 ^a	120 ^a
12	2776.00 ^b	1500 ^b

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.2.1.2 Tamaño de partícula

En la Figura 38 se muestran las curvas de distribución de tamaño de partícula para cada concentración de almidón lipofílico con y sin el uso de ultrasonido. En la concentración de 6% las curvas (con y sin ultrasonido) son iguales y presentan una bimodalidad, la mayor densidad de distribución se obtuvo al tamaño de partícula de 10 μm ; para la concentración de 8% las curvas con y sin el uso de ultrasonido son muy similares y la mayor densidad de distribución se obtuvo al tamaño de 5 μm .

Finalmente en la concentración de 12% el uso de ultrasonido si influyó en el tamaño de partícula de la emulsión base, ya que se puede observar el desplazamiento de la curva hacia tamaños de partícula menores, causando un aumento en la densidad de distribución, en el tamaño de 40 μm aproximadamente

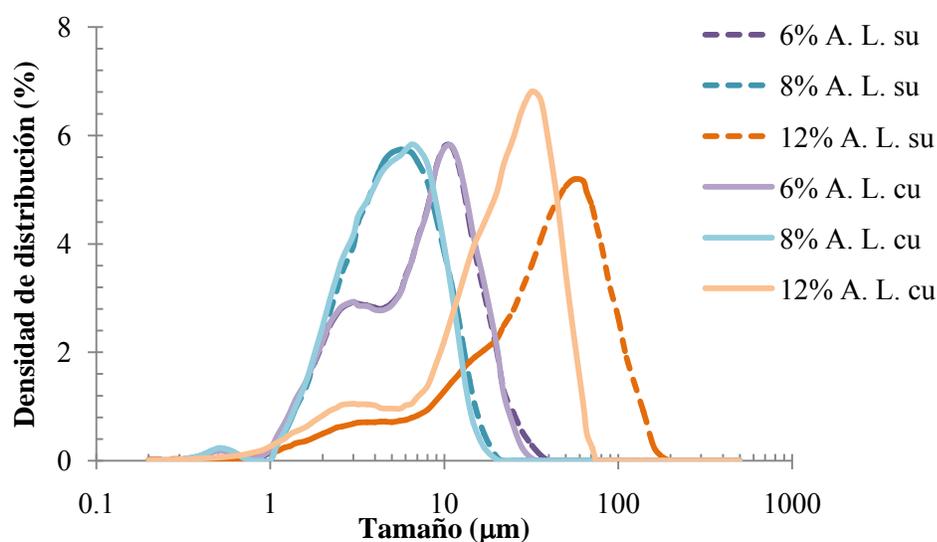


Figura 38. Distribución del tamaño de partícula con ultrasonido (cu) y sin el uso de ultrasonido (su), para las diferentes concentraciones de almidón lipofílico (AL).

El Cuadro 15 muestra el tamaño de partícula para las concentraciones de almidón lipofílico. De acuerdo con el análisis ANOVA, la concentración de almidón lipofílico tiene una influencia significativa en el diámetro promedio de partícula de la emulsión, de tal manera que para las concentraciones de 6% tenemos diámetros de partícula que van desde 1.9 a 15 μm , los cuales no sufren cambios con el uso del ultrasonido. En la concentración de 8% los diámetros van desde 1.98 a 10 μm , de igual manera éstos no sufren cambios con el uso de

ultrasonido. Finalmente para la concentración de 12%, el tamaño de partícula oscila entre 5 y 83 μm , el cual disminuye notablemente con el uso de ultrasonido. El análisis estadístico mostró que el incremento en la concentración de almidón lipofílico tuvo una influencia significativa en el tamaño de partícula de la emulsión base (Cuadro 15).

La disminución del tamaño de partícula, cuando se aumentó la concentración de 6% a 8%, coincidió con lo encontrado por Dokic y col. (2012), en emulsiones aceite/agua estabilizadas con almidón OSA, quienes lo atribuyeron a la disminución en el tiempo de difusión de las moléculas de almidón OSA en la superficie de los glóbulos de aceite, así como a la formación de una capa de adsorción más gruesa o completa, los cuales fueron influenciados por el aumento de la concentración del tensoactivo en la fase continua. En cambio, cuando se aumentó la concentración de 8% a 12% el tamaño de partícula también aumentó, esto puede deberse a que la emulsión base con 12% fue muy inestable (Cuadro 16) y los mecanismos de desestabilización como la floculación y la coalescencia, llevan a un aumento del tamaño de partícula conforme transcurre el tiempo.

Cuadro 15. *Tamaño de partícula de las emulsiones base con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.*

Concentración de almidón lipofílico (%)	Ultrasonido	10% acumulado (μm)	50% acumulado (μm)	90% acumulado (μm)	Diámetro promedio (μm)
6%	Sin	1.95	7.13	15.45	8.02
	Con	1.93	7.09	15.09	7.85^a
	C. V. (%)	0.79	0.57	0.73	0.60
8%	Sin	1.98	4.79	10.03	5.47
	Con	1.92	4.68	9.58	5.28^b
	C. V. (%)	0.60	0.24	0.20	0.22
12%	Sin	5.38	36.75	83.66	41.57
	Con	3.28	21.18	42.73	22.52^c
	C. V. (%)	5.28	3.28	1.13	2.20

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales. El C. V: es para las muestras con ultrasonido.

3.2.1.3 Estabilidad. Transmisión-retrodispersión de un haz de luz

En la Figura 39 se muestran las cinéticas de incremento de espesor de clarificado para las emulsiones base con diferentes concentraciones de almidón lipofílico, se observa que la emulsión más estable fue la de 8% de almidón, mientras que la emulsión menos estable fue la de 12% almidón, ya que su desestabilización ocurrió a una mayor velocidad, esto se puede atribuir a que en el sistema había exceso de almidón, lo que provocó que las moléculas de almidón se unieran entre sí apartando los demás componentes y por lo tanto desestabilizando el sistema, a este fenómeno se le conoce como floculación por depleción.

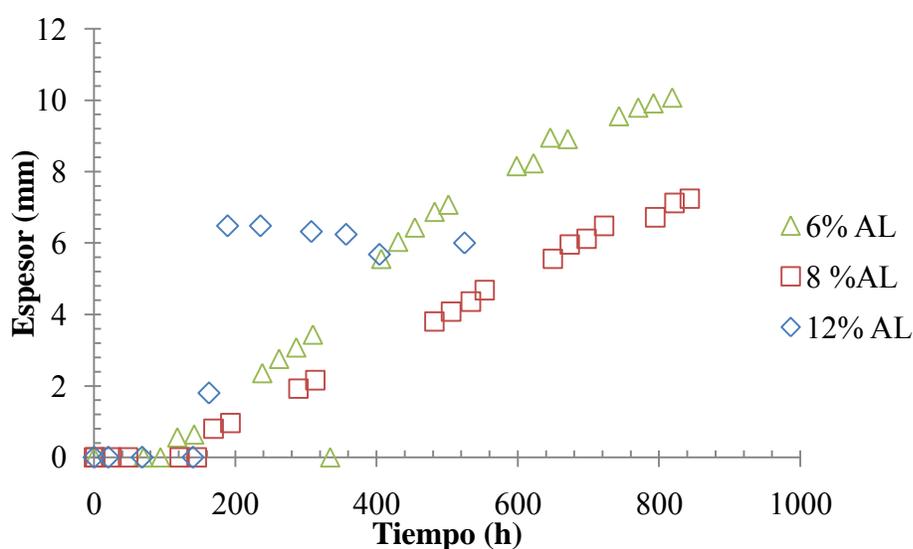


Figura 39. Cinéticas de espesor absoluto de la zona de clarificado de las emulsiones con diferentes concentraciones de almidón lipofílico (AL).

En el Cuadro 16 se observan los parámetros del modelo sigmoideal para las diferentes concentraciones de almidón lipofílico, de acuerdo con el análisis estadístico, el aumento en la concentración de 6 a 8% no tuvo influencia significativa en el espesor de drenado, pero si hubo diferencia al aumentar a 12%. Las tres concentraciones si tuvieron influencia en el tiempo medio de drenado. Cuando se incrementó la concentración de almidón de 6% a 8% el tiempo medio aumentó, lo que habla de mayor estabilidad, ya que hay una mayor cantidad de almidón disponible para estabilizar la interfase agua/aceite de la emulsión, también aumentó la viscosidad de la fase continua y así se redujo la movilidad de los glóbulos de grasa y disminuyó la formación de cremado (Dokic y col., 2012).

Dokic y col. (2012), evaluaron emulsiones aceite en agua a diferentes concentraciones de almidón lipofílico (8-16%), con una concentración de aceite de girasol de 20%, ellos encontraron que al aumentar la concentración de almidón lipofílico, aumenta la estabilidad de la emulsión. El hecho de que en nuestro estudio se haya encontrado que al aumentar la concentración de almidón al 12%, disminuyó la estabilidad, se puede atribuir a que en el sistema se encontraban presentes varios componentes como proteínas de leche, goma xantana, diferente tipo de fase lipídica y el mismo almidón lipofílico, lo que generaba mayor competencia entre éstos por la interfase del sistema, lo que ocasionó la desestabilización de la emulsión en un menor tiempo.

Cuadro 16. *Parámetros del modelo sigmoideal de las emulsiones base con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.*

Concentración de almidón lipofílico (%)	Espesor máx. (mm)		Sigmoidealidad		Tiempo medio (h)	
	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)
6	11.55 ^a	9.66	3.27	21.55	480.64 ^a	2.03
8	10.64 ^a	14.81	3.84	18.35	674.52 ^b	4.46
12	6.18 ^b	6.72	79.55	10.94	178.08 ^c	6.63

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.2.2. Crema batida. Efecto de la concentración de almidón lipofílico

3.2.2.1 Tiempo de batido y rendimiento

El Cuadro 17 muestra los resultados del rendimiento de las cremas batidas con las diferentes concentraciones de almidón lipofílico, la crema que tuvo un mayor rendimiento fue la de 8%, mientras que la concentración con la que se obtuvo un menor rendimiento fue la de 12%. En cuanto al tiempo de batido, en el caso de 12%, requirió un menor tiempo para formar la crema batida, esto es congruente con que es la emulsión menos estable, ya que más almidón compite por la interfase con la proteína, desestabilizando más rápido y por lo tanto disminuyendo el rendimiento. La emulsión base que requirió el mayor tiempo de

batido fue la de 8%, que al ser la más estable, necesitó mayor trabajo mecánico para promover la coalescencia parcial.

De acuerdo con el análisis estadístico la concentración de 6% no tuvo diferencias significativas con las otras dos concentraciones, sin embargo, si hubo influencia al aumentar la concentración de 8% a 12%. El bajo rendimiento con 12% de almidón lipofílico se puede deber a la formación de aglomerados presentes en la emulsión base, ya que probablemente al comienzo del batido éste sólo deshizo los aglomerados, para después comenzar la formación de coalescencia parcial de los glóbulos de grasa, así como las burbujas de aire.

Cuadro 17. *Tiempo de batido y rendimiento de la crema batida con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.*

Concentración de almidón lipofílico (%)	Tiempo de batido (min)	Rendimiento (%)	C. V (%)
6%	21	44.50 ^{a b}	5.35
8%	29	48.28 ^a	2.38
12%	11	39.55 ^b	2.99

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.2.2.2 Densidad

El Cuadro 18 muestra los valores de densidad de la crema batida para cada concentración de almidón lipofílico. En el caso de la concentración de 8%, esta es estadísticamente igual a las concentraciones de 6% y 12%, sin embargo, al aumentar la concentración de 6% a 12% si hubo una influencia significativa en la densidad de la crema batida. La crema batida con 12% presentó el menor rendimiento, tuvo en consecuencia la mayor densidad.

Cuadro 18. *Densidad de la crema batida con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.*

Concentración de almidón lipofílico (%)	Densidad (g/cm³)	C. V. (%)
6%	0.61 ^a	1.21
8%	0.61 ^a	1.21
12%	0.64 ^b	1.13

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.2.2.3 Tamaño de burbuja

El aumento de la concentración de almidón lipofílico produjo una disminución en el tamaño promedio de burbuja de la crema batida (Cuadro 19). Esto resulta beneficioso para la estabilidad así como para los parámetros texturales. El análisis estadístico muestra que los resultados del diámetro promedio de burbuja en la concentración de almidón lipofílico de 6% no son estadísticamente iguales a las concentraciones de 8% y 12%, por lo que el aumentar la concentración si influye significativamente en el tamaño de burbuja. Sin embargo, entre 8% y 12% no hay una diferencia significativa.

Cuadro 19. *Diámetro promedio de burbuja para la crema batida con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.*

Concentración de almidón lipofílico	Intervalo de diámetros de burbuja (μm)	Diámetro promedio (μm)	C. V. (%)
6%	108.50 – 192.70	143.06 ^a	20.87
8%	51.61 – 96.41	78.20 ^b	20.02
12%	50.50 – 97.89	76.92 ^b	20.86

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.2.2.4 Propiedades texturales

En la Figura 40 se pueden observar las curvas de adhesividad para las diferentes concentraciones de almidón lipofílico, la crema batida con una mayor consistencia fue la de 12%, mientras que la de menor consistencia fue la de 8%, este comportamiento se repitió para la fuerza adhesiva. El hecho de que la crema con 8% haya tenido características más bajas que la de 6%, se le atribuyó, a que fue la emulsión base más estable, por lo que fue más difícil que se diera la coalescencia parcial de los glóbulos de grasa, por lo que no se formó la red tridimensional alrededor de las burbujas resultando en una estructura débil.

La adhesividad, la fuerza adhesiva y el estiramiento disminuyeron cuando se aumentó la concentración de 6% a 8% de almidón lipofílico, mientras que estos aumentaron cuando se aumentó la concentración de 8% a 12%. La untabilidad sufrió un aumento cuando la concentración pasó de 6% a 8% y disminuyó cuando la concentración aumentó de 8% a 12%, por lo que las diferentes concentraciones de almidón lipofílico sí tienen una influencia significativa en las propiedades texturales de la crema batida (Cuadro 20).

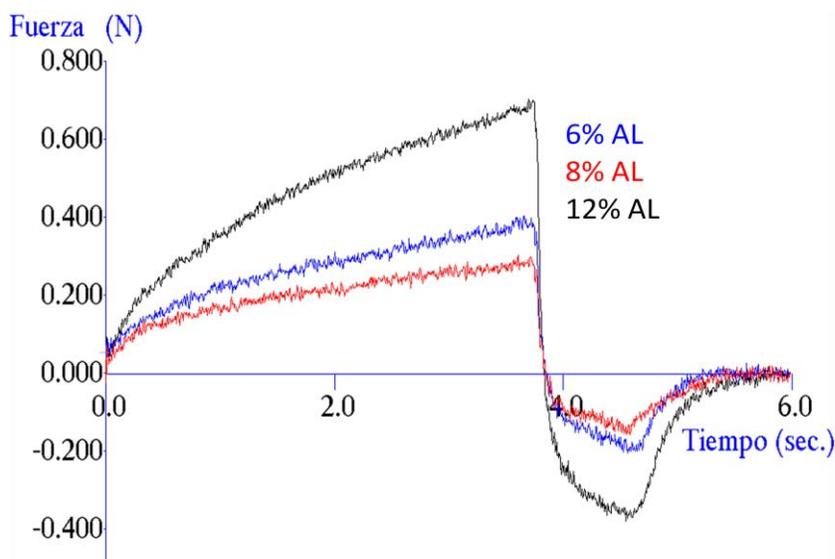


Figura 40. Curvas de adhesividad de las cremas batidas con diferentes concentraciones de almidón lipofílico (AL).

Cuadro 20. Parámetros obtenidos en la prueba de adhesividad para crema batida con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.

Concentración de almidón lipofílico	Consistencia (N)		Fuerza adhesiva (N)		Estiramiento (mm)		Adhesividad (N*s)		Untabilidad (mm/N)	
	Prom	C.V. (%)	Prom	C.V. (%)	Prom	C.V. (%)	Prom	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)
6%	0.40 ^a	2.63	-0.21 ^a	2.20	17.62 ^a	0.42	-0.15 ^a	3.70	-83.46 ^a	2.18
8%	0.30 ^b	6.29	-0.16 ^b	4.79	17.60 ^a	0.46	-0.12 ^b	6.98	-112.4 ^b	4.96
12%	0.71 ^c	5.91	-0.39 ^c	5.84	17.74 ^b	0.74	-0.36 ^c	5.76	-45.87 ^c	5.81

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.2.2.5 Estabilidad por transmisión-retrodispersión

Las cremas batidas con 6 y 8% empezaron a drenar al mismo tiempo (aproximadamente 0.2 h), mientras que la de 12% lo hizo hasta aproximadamente 0.35 h (Figura 41). El Cuadro 21 muestra los parámetros del modelo sigmoideal con su análisis estadístico, donde se observa que el espesor de drenado fue estadísticamente igual para las concentraciones de 6 y 8% y diferente para 12% de almidón lipofílico, observándose la misma tendencia en el tiempo medio de drenado. En este caso, el mayor tiempo medio de drenado de la crema batida con 12% de almidón lipofílico se puede relacionar con el hecho de que tardó más tiempo en iniciar el drenado, por lo que se puede considerar como más estable. Debido a que al haber una mayor cantidad de almidón lipofílico disponible y ser la emulsión base más inestable se produjo más fácilmente la coalescencia parcial que protegió las burbujas de aire y al tener la fase continua más viscosa retardan el clarificado.

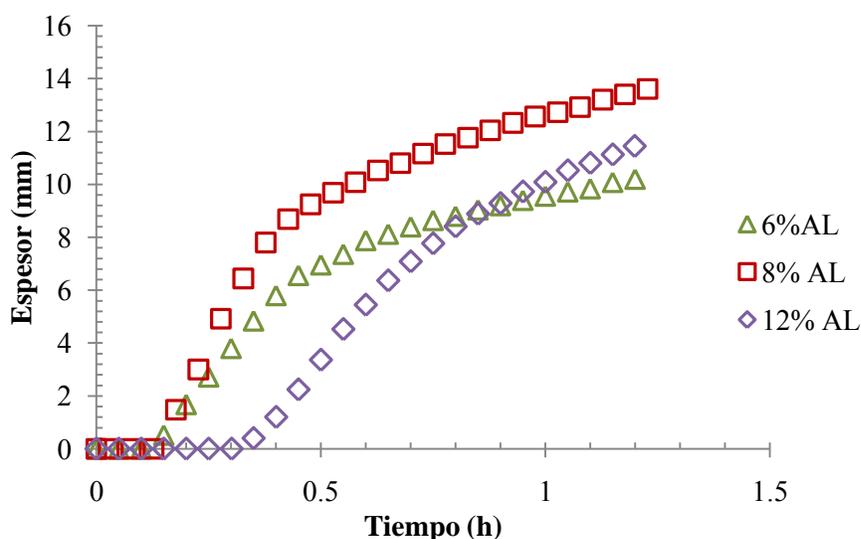


Figura 41. Cinética de espesor absoluto de clarificado para las cremas batidas, a diferentes concentraciones de almidón lipofílico (AL).

Cuadro 21. *Parámetros del modelo sigmoideal para la clarificación de la crema batida con diferentes concentraciones de almidón lipofílico.*

Concentración de almidón lipofílico (%)	Espesor máx. (mm)		Sigmoidealidad		Tiempo medio (h)	
	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)
6	11.45 ^a	1.14	2.42	5.40	0.41 ^a	11.71
8	11.12 ^a	31.32	2.56	1.79	0.47 ^a	31.74
12	12.91 ^b	12.03	4.01	3.11	0.56 ^b	18.61

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.3 Objetivo particular 3

3.3.1 Emulsión base. Efecto de la concentración de leche descremada

3.3.1.1 Comportamiento al flujo

En la Figura 42 se puede observar que la concentración de 7.5% fue la que requirió mayores esfuerzos de cizalla. La viscosidad a la concentración de 5% es casi constante a lo largo del intervalo, mientras que a 7.5% es mucho mayor y disminuye conforme aumenta la velocidad de cizalla (Figura 43). El aumento de viscosidad se debió a la mayor cantidad de sólidos lácteos no grasos presentes en el sistema.

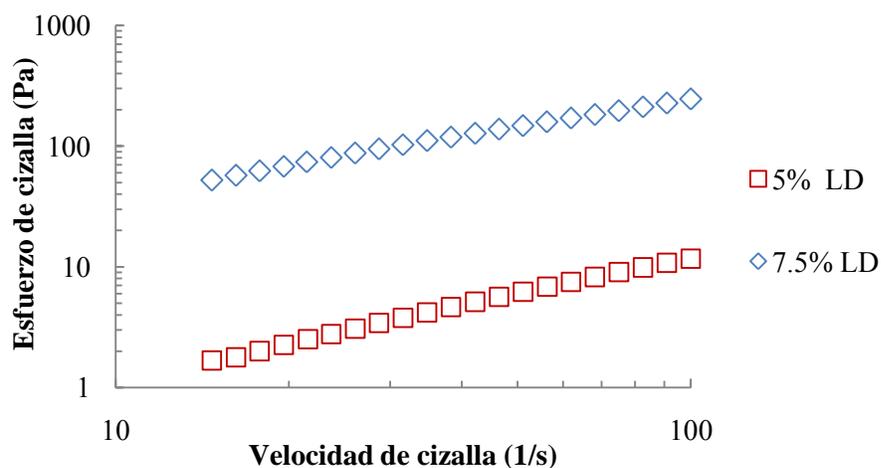


Figura 42. Curva de flujo de emulsiones con diferentes concentraciones de leche descremada (LD).

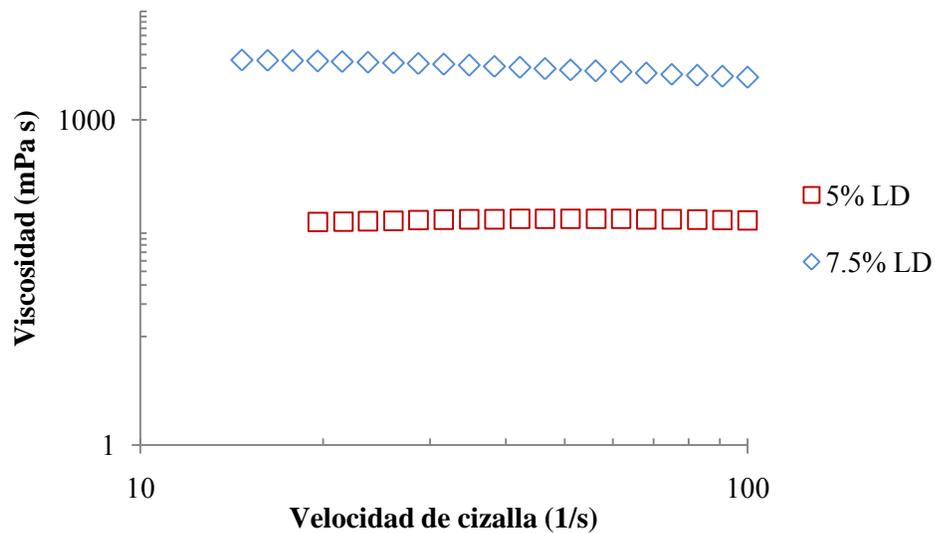


Figura 43. Curva de viscosidad de las emulsiones con diferentes concentraciones de leche descremada (LD).

El Cuadro 22 muestra los parámetros reológicos que se obtuvieron de las 2 concentraciones de leche descremada en la emulsión base, en el caso de la emulsión con 5%, el comportamiento que mostró fue de un fluido newtoniano, es decir, que su viscosidad no se vio influenciada por la cizalla, mientras que al aumentar la concentración de leche a 7.5%, la emulsión base presentó el comportamiento de un fluido de la potencia.

Cuadro 22. Parámetros reológicos de la emulsión base con diferentes concentraciones de leche descremada.

Concentración de leche descremada (%)	Potencia					Newtoniano		
	n	C.V. (%)	k (Pa s ⁿ)	C.V. (%)	R ²	η (mPa s)	C.V. (%)	R ²
5	-	-	-	-	-	120	4.29	0.999
7.5	0.80	0.53	6.50	1.72	0.998	-	-	-

En el Cuadro 23 se muestran las viscosidades a 30 s⁻¹ y 100 s⁻¹, junto con el análisis estadístico, por lo que se puede afirmar que el aumento en la concentración de leche descremada influyó significativamente en la viscosidad de la emulsión base, debido a que al

aumentar la concentración de leche descremada hay un mayor contenido de sólidos presentes en la fase continua lo que incrementa su viscosidad.

Cuadro 23. *Viscosidades a dos velocidades de cizalla de las emulsiones base a diferentes concentraciones de leche descremada.*

Concentración de leche descremada (%)	η_{30} (mPa s)	η_{100} (mPa s)
5	120 ^a	120 ^a
7.5	3340 ^b	2490 ^b

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.3.1.2 Tamaño de partícula

La Figura 44 presenta la distribución del tamaño de partícula de las emulsiones base a las dos concentraciones de leche descremada. Se observa como el uso del ultrasonido no afectó el tamaño de partícula de la concentración de 5%, pues ambas curvas son casi iguales, la mayor densidad de distribución fue a 4 μm y un pequeño pico en 0.5 μm .

Mientras que para la concentración a 7.5%, el tamaño de partícula presentó un comportamiento bimodal sin el uso del ultrasonido, presentando la mayor densidad de distribución a 5.5 μm en el primer pico y 100 μm en el segundo pico, lo que habla de la existencia de aglomerados por la gran cantidad de componentes presentes en la emulsión; el uso del ultrasonido provocó la disminución del tamaño de partícula y la desaparición de la bimodalidad, aumentando la densidad de distribución en el tamaño de 8 μm , dando un comportamiento similar a la muestra con 5%. Esta formación de aglomerados puede justificar el incremento de la viscosidad y su dependencia con la velocidad de cizalla.

El Cuadro 24 muestra el tamaño de partícula para las diferentes concentraciones de leche descremada. Con el análisis estadístico, se obtuvo que el aumento de concentración de leche descremada influyó significativamente en el tamaño de partícula de la emulsión base, puesto que para la concentración de 5% los diámetros de partícula estuvieron entre 1.98 y 10 μm , y para 7.5% los diámetros oscilaron entre 2.1 y 95 μm , antes del ultrasonido.

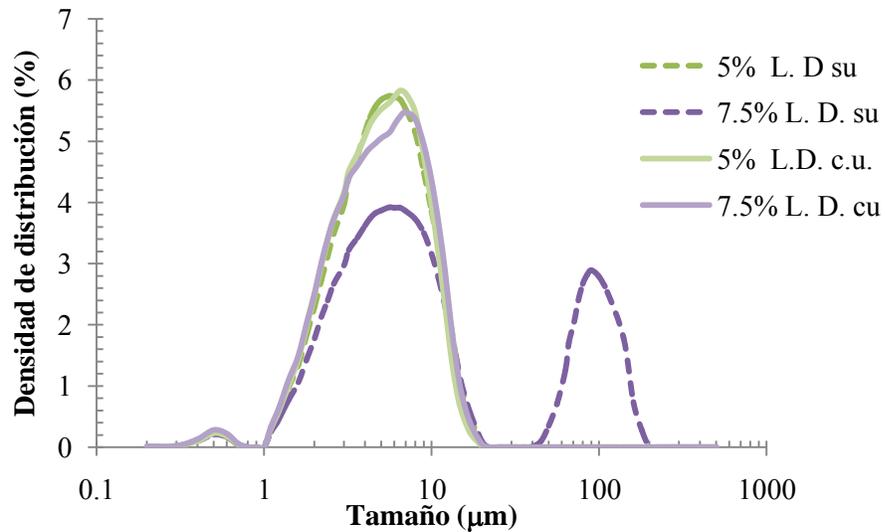


Figura 44. Distribución del tamaño de partícula con ultrasonido (c.u.) y sin el uso de ultrasonido (s.u.), para las diferentes concentraciones de leche descremada (L.D.).

Cuadro 24. *Tamaño de partícula de la emulsión base con diferentes concentraciones de leche descremada.*

Concentración de leche descremada (%)	Ultrasonido	10% acumulado (µm)	50% acumulado (µm)	90% acumulado (µm)	Diámetro promedio (µm)
5	Sin	1.98	4.79	10.03	5.47
	Con	1.92	4.68	9.58	5.28^a
	C. V.	0.60	0.25	0.21	0.22
7.5	Sin	2.13	6.45	95.69	26.74
	Con	1.88	4.78	10.30	5.52^b
	C. V.	0.31	1.03	3.08	2.09

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales. El C.V. es para las muestras con ultrasonido.

3.3.1.3 Estabilidad. Transmisión-retrodispersión

La Figura 45 ilustra las cinéticas de espesor absoluto, para las emulsiones con diferentes concentraciones de leche descremada. Se observa que la emulsión más estable fue la de 7.5% de leche, ya que el tiempo de inicio del clarificado fue alrededor de 700 h y el aumento de espesor de clarificado fue muy lento. La concentración de 7.5% fue más estable debido a que hubo una mayor cantidad de proteína láctea presente en el sistema, pues las

proteínas estabilizan la interfase formando una fuerte red viscoelástica en la cual las moléculas de las proteínas están esencialmente inmóviles e interactúan entre ellas, por lo que las emulsiones se vuelven más estables contra la coalescencia conforme aumenta la concentración de proteína (Leser y Michel, 1999).

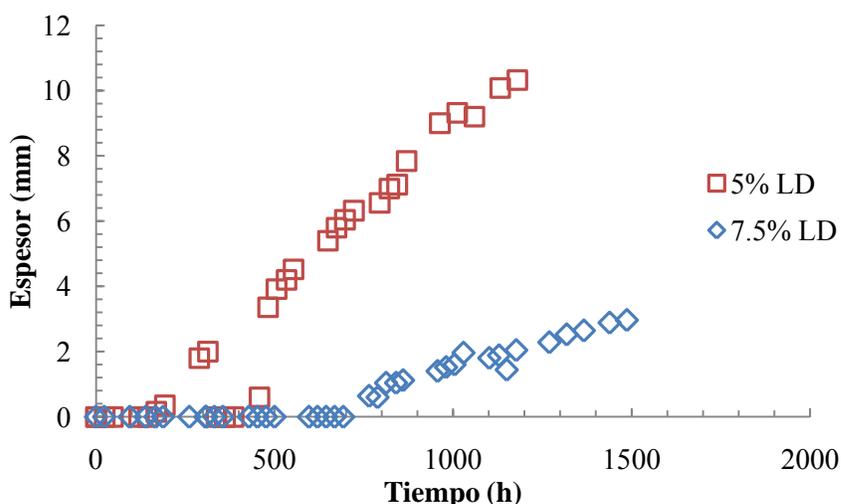


Figura 45. Cinéticas de espesor absoluto de la zona de clarificado para emulsiones base con diferentes concentraciones de leche descremada (L.D.).

En el Cuadro 25 se muestran los espesores de clarificado obtenidos para las concentraciones de leche descremada, un menor espesor y un mayor tiempo corresponden a la emulsión más estable, en este caso fue la de 7.5%, por lo que la concentración de leche descremada si tiene una influencia significativa en la estabilidad de la emulsión base, ya que la aumentó considerablemente.

Cuadro 25. Parámetros del modelo sigmoideal de la emulsión base con diferentes concentraciones de leche descremada.

Concentración de leche descremada (%)	Espesor máximo (mm)		Sigmoidealidad		Tiempo medio (h)	
	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)
5	10.64 ^a	14.81	3.84	18.35	674.52 ^a	4.46
7.5	2.80 ^b	16.83	6.56	25.56	1090.66 ^b	9.65

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.3.2 Crema batida. Efecto de la concentración de leche descremada

3.3.2.1 Tiempo de batido y rendimiento

La concentración de 5% fue la que tuvo un mayor rendimiento y para el cual se requirió un menor tiempo de batido, mientras que la de 7.5% fue la crema que requirió más tiempo para batirse y aun así tuvo un rendimiento menor (Cuadro 26), ya que como se vio anteriormente la emulsión de 7.5% fue más estable, debido a que tiene una mayor cantidad de proteínas, lo que previene la adsorción de los glóbulos de grasa a la interfase aceite/agua proporcionando una mayor estabilidad de los glóbulos de grasa a la coalescencia parcial durante el proceso de batido (Kim y col., 2013), lo que también provocó el aumento del tiempo de batido.

Cuadro 26. *Tiempo de batido y rendimiento de la crema batida con diferentes concentraciones de leche descremada.*

Concentración de leche descremada (%)	Tiempo de batido (min)	Rendimiento (%)	C. V (%)
5	29	48.28 ^a	2.38
7.5	39	39.14 ^b	4.99

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.3.2.2 Densidad

Las densidades fueron las mismas en ambas concentraciones (Cuadro 27). Por lo que el aumento en la concentración de leche descremada no tuvo un efecto significativo en la densidad de la crema batida.

Cuadro 27. *Densidad de la crema batida con diferentes concentraciones de leche descremada.*

Concentración de leche descremada (%)	Densidad (g/cm³)	C. V. (%)
5	0.61 ^a	1.21
7.5	0.61 ^a	1.98

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.3.2.3 *Tamaño de burbuja*

El tamaño de burbuja de la crema batida disminuyó conforme la concentración de leche descremada aumentó, al aplicar el análisis estadístico, se obtuvo que los resultados fueron estadísticamente diferentes, lo que significa que el aumento de la concentración de leche descremada, tiene una influencia significativa en el tamaño de burbuja.

En el caso de la concentración de 7.5% se pudo deber a la estabilidad de la emulsión base, ya que se tardó más tiempo en desestabilizarse que la de la concentración de 5%, por lo que se hace más difícil la incorporación del aire, y al tener un mayor tiempo de batido las burbujas de aire quedaron muy pequeñas (Cuadro 28), pues la agitación mecánica rompe las burbujas de aire conforme transcurre el tiempo.

Cuadro 28. *Diámetro promedio de burbuja para la crema batida con diferentes concentraciones de leche descremada.*

Concentración de leche descremada (%)	Intervalo de diámetros de burbuja (μm)	Diámetro promedio (μm)	C. V. (%)
5	51.61 – 96.41	78.19 ^a	20.01
7.5	40.05 – 97.5	70.28 ^b	25.24

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.3.2.4. *Propiedades texturales*

En este caso ambas concentraciones dieron parámetros texturales casi iguales, pues en la Figura 46 se puede observar que la diferencia en ambas curvas es mínima. El análisis estadístico demostró que el aumento en la concentración de leche descremada, no tuvo influencia significativa en los parámetros texturales de la crema batida. Sólo en la untabilidad, la cual disminuyó conforme aumentó la concentración de leche descremada (Cuadro 29).

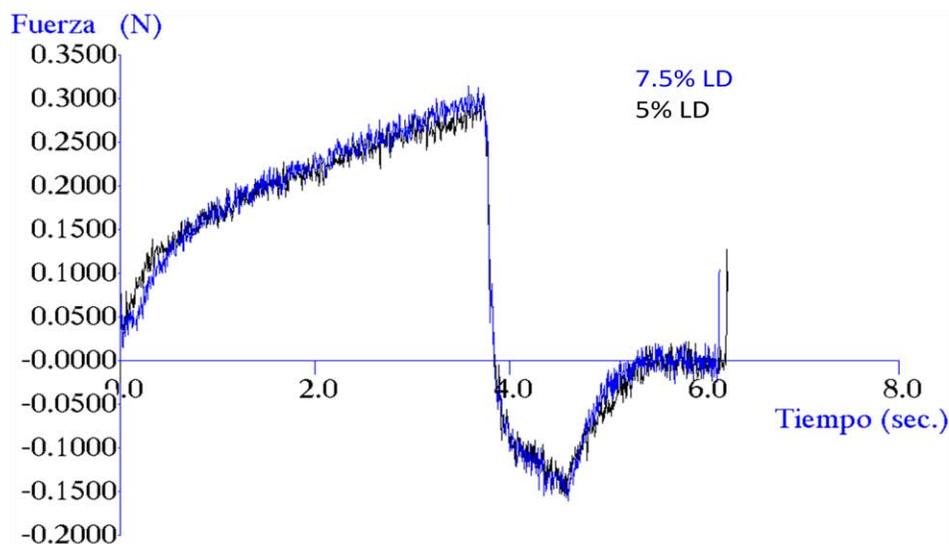


Figura 46. Curvas de adhesividad de las cremas batidas con diferentes concentraciones de leche descremada (LD).

Cuadro 29. Parámetros obtenidos en la prueba de adhesividad para crema batida con diferentes concentraciones de leche descremada.

Concentración de leche descremada (%)	Consistencia (N)		Fuerza adhesiva (N)		Estiramiento (mm)		Adhesividad (N*s)		Untabilidad (mm/N)	
	Prom.	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)
5	0.31 ^a	2.49	-0.15 ^a	1.85	17.65 ^a	0.80	-0.12 ^a	10.43	-115 ^a	2.65
7.5	0.31 ^a	3.88	-0.17 ^a	4.21	17.60 ^a	0.31	-0.12 ^a	3.10	-106 ^b	4.01

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.3.2.5 Estabilidad por transmisión-retrodispersión de luz

En la Figura 47 se presentan las cinéticas de espesor máximo de clarificado para las dos concentraciones de leche descremada, se puede observar que la concentración de 7.5% tardó un poco más tiempo en iniciar el drenado, sin embargo, alcanzó un mayor espesor de drenado, debido al mayor tiempo de batido, que resultó en un debilitamiento de la estructura de la crema batida.

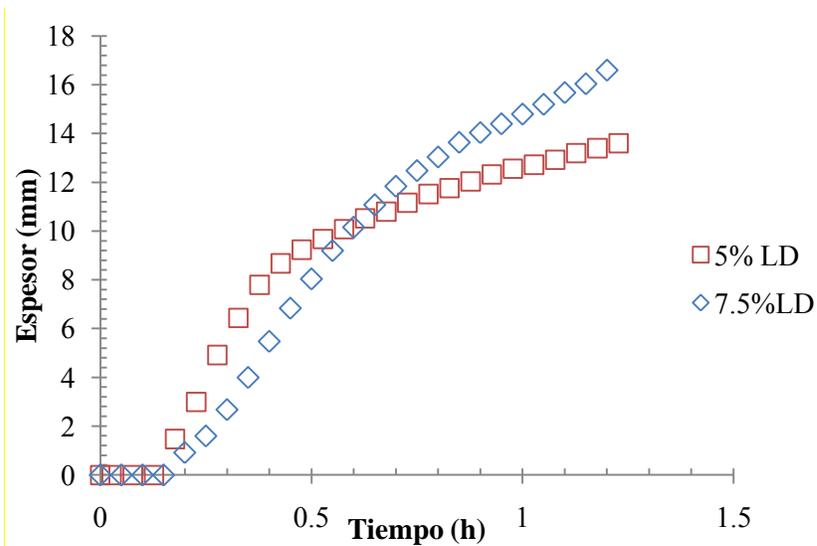


Figura 47. Cinética de espesor absoluto para las cremas batidas, a diferentes concentraciones de leche descremada (LD).

La crema batida que presentó el máximo espesor de drenado fue la de 7.5%, por lo que se puede concluir que es la crema menos estable de las dos concentraciones a evaluar en este objetivo (Cuadro 30). La concentración de leche descremada tiene una influencia significativa en el espesor del drenado, pues los datos obtenidos no fueron estadísticamente iguales, pero en el tiempo medio, la concentración no tiene influencia. De acuerdo con Leser y Michel (1999), mientras más estable es una emulsión hay una mayor dificultad en desestabilizarla y se obtienen cremas batidas menos estables, lo que ocurrió con la concentración de 7.5%.

Cuadro 30. Parámetros del modelo sigmoideal para el drenado de la crema batida con diferentes concentraciones de leche descremada.

Concentración de leche descremada (%)	Espesor máx. (mm)		Sigmoidealidad		Tiempo medio (h)	
	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)
5	11.12 ^a	31.32	2.56	1.79	0.47 ^a	31.74
7.5	17.88 ^b	0.35	2.45	17.86	0.52 ^a	5.48

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.4 Objetivo particular 4

3.4.1 Emulsión base. Efecto de la concentración de grasa vegetal

3.4.1.1 Comportamiento al flujo

En la Figura 48 se puede observar que la emulsión con 30% grasa vegetal fue la que necesitó un mayor esfuerzo de cizalla, debido a la presencia de una mayor cantidad de grasa semisólida. En la Figura 49 se aprecia que la viscosidad de la concentración de 20% permanece constante, conforme aumenta la velocidad de cizalla, mientras que para la concentración de 25% la viscosidad mostró una ligera disminución con el aumento de la velocidad de cizalla. Finalmente la concentración de 30% es la que tuvo una mayor viscosidad y disminuyó constantemente conforme aumentó la velocidad de cizalla. Al haber una mayor cantidad de grasa vegetal en el sistema, hay una mayor cantidad de glóbulos formados y a la temperatura de evaluación que fue de 10 °C la grasa se encontraba en un estado semi-sólido, lo que provocó la gran diferencia de viscosidad entre las concentraciones.

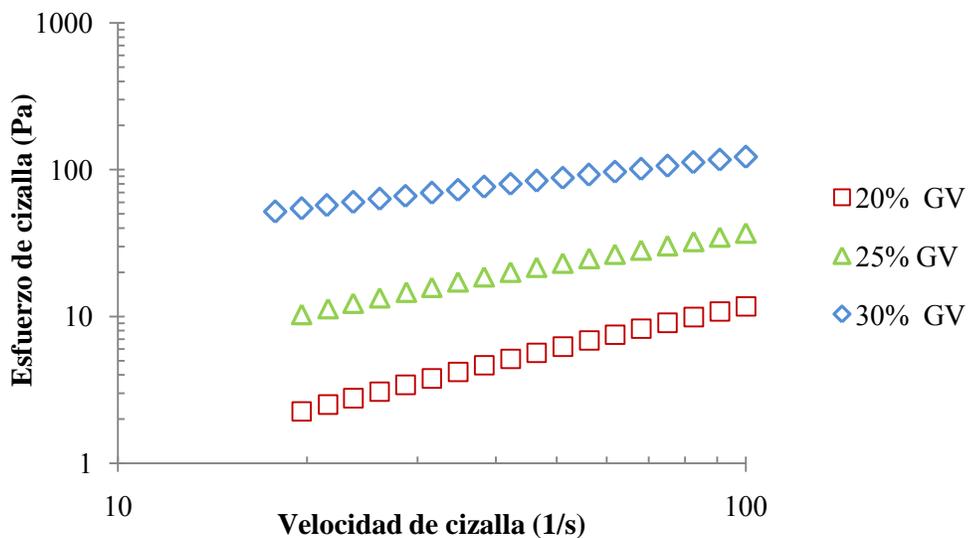


Figura 48. Curva de flujo de emulsiones para las diferentes concentraciones de grasa vegetal (GV).

El Cuadro 31 muestra los parámetros reológicos que se obtuvieron de las tres concentraciones de grasa vegetal en la emulsión base, en el caso de la emulsión con 20%, el comportamiento que mostró fue de un fluido newtoniano, es decir que su viscosidad no se

vio influenciada por la cizalla, mientras que al aumentar la concentración de grasa a 25% y 30%, la emulsión base tomó el comportamiento de un fluido de la potencia. El índice de consistencia aumentó notablemente y el índice de comportamiento al flujo disminuyó al aumentar de 25 a 30%, haciendo a la emulsión más consistente y adelgazante a la cizalla. Una vez realizado el análisis estadístico (Cuadro 32), se confirmó que el aumento en la concentración de grasa vegetal, tiene una influencia significativa en el aumento de la viscosidad de la emulsión base.

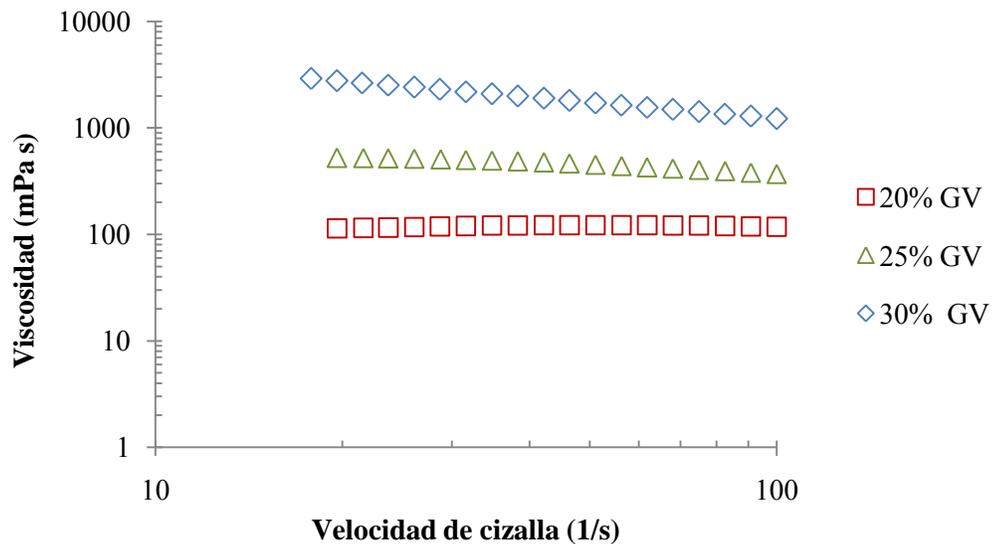


Figura 49. Curva de viscosidad para la emulsión con diferentes concentraciones de grasa vegetal (GV).

Cuadro 31. Parámetros reológicos para las diferentes concentraciones de grasa vegetal.

Concentración de grasa vegetal (%)	Potencia					Newtoniano		
	n	C.V. (%)	k (Pa s ⁿ)	C.V. (%)	R ²	η (mPa s)	C.V. (%)	R ²
20	-	-	-	-	-	120	4.29	0.999
25	0.78	0.45	1.09	4.10	0.997	-	-	-
30	0.48	4.57	12.82	3.47	0.998	-	-	-

Cuadro 32. Viscosidad a dos velocidades de cizalla de las emulsiones base a diferentes concentraciones de grasa vegetal.

Concentración de grasa vegetal (%)	η_{30} (mPa s)	η_{100} (mPa s)
20	120 ^a	120 ^a
25	514 ^b	378 ^b
30	2050 ^c	1090 ^c

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.4.1.2 Tamaño de partícula

En la Figura 50 se muestra la distribución del tamaño de partícula a diferentes concentraciones de grasa vegetal, se puede observar que las curvas para la concentraciones de 20% (con y sin ultrasonido) fueron casi iguales y su mayor densidad de distribución fue al tamaño de 5 μm , sin embargo, para la concentración de 25% se obtuvo una curva trimodal; al utilizar ultrasonido no desapareció la multimodalidad, pero el tamaño de partícula se desplazó hacia tamaños más pequeños, los tres picos que se obtuvieron se encontraron a los tamaños de partícula de 4, 10 y 40 μm aproximadamente. Por último, la concentración de 30%, sin ultrasonido igual fue trimodal, pero en este caso el uso del ultrasonido además de disminuir el tamaño de partícula hizo a la curva bimodal, con las mayores densidades de población en el tamaño de alrededor de 4 y 20 μm .

El tamaño promedio de partícula de la concentración de 20% fue el más pequeño y estuvo entre 1.9 y 10 μm sin ultrasonido, el mayor tamaño de partícula se presentó en la concentración de 25% y sus acumulados estuvieron entre 2.2 y 87 μm , antes del uso de ultrasonido. El aumento de la concentración de 20% a 25% si tuvo una influencia significativa en el tamaño de partícula, pero en las concentraciones de 25% y 30% no hubo influencia (Cuadro 33), sin embargo, en estas concentraciones el uso de ultrasonido tuvo un mayor efecto, lo que indica la presencia de aglomerados de grasa en la emulsión base.

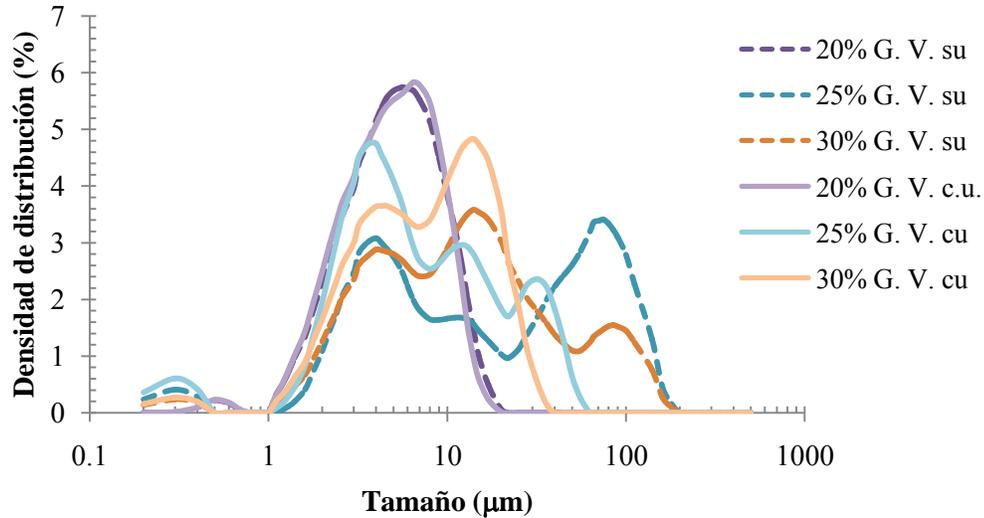


Figura 50. Distribución del tamaño de partícula con ultrasonido (c.u.) y sin el uso de ultrasonido (s.u.), para las diferentes concentraciones de grasa vegetal (GV).

Cuadro 33. *Tamaño de partícula de las emulsiones base con diferentes concentraciones de grasa vegetal.*

Concentración de grasa vegetal (%)	Ultrasonido	10% acumulado (µm)	50% acumulado (µm)	90% acumulado (µm)	Diámetro promedio (µm)
20	Sin	1.98	4.79	10.03	5.47
	Con	1.92	4.68	9.58	5.28^a
	C. V.	0.60	0.25	0.21	0.22
25	Sin	2.2	12.32	87.01	31.72
	Con	1.69	5.46	30.04	10.88^b
	C. V.	4.14	14.69	18.73	21.81
30	Sin	2.37	10.78	65.03	21.82
	Con	2.11	7.30	18.53	9.00^b
	C. V.	1.25	7.19	6.72	6.14

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales. El C.V. es para las muestras con ultrasonido.

3.4.1.3 Estabilidad por transmisión-retrodispersión

En la Figura 51 se puede observar claramente que el aumento de grasa vegetal implica un aumento en la estabilidad de la emulsión base, sin embargo, la concentración de 25% resultó

ser más estable que la de 30%, pues esta última tiene una pendiente más pronunciada e inicia antes el clarificado. Se puede atribuir este comportamiento al hecho de que a la concentración de 25% hubo suficiente almidón para estabilizar adecuadamente los glóbulos de grasa de la emulsión, por lo que al aumentar la concentración a 30% el almidón no fue suficiente, lo que provocó la desestabilización en un menor tiempo.

En cuanto al espesor máximo, la concentración de 25% fue la que tuvo un menor espesor así como un mayor tiempo para alcanzar dicho espesor (Cuadro 34). Mientras que la menos estable fue la de 20% grasa vegetal, por lo que el aumento de la grasa tiene una influencia significativa en la estabilidad de la emulsión base.

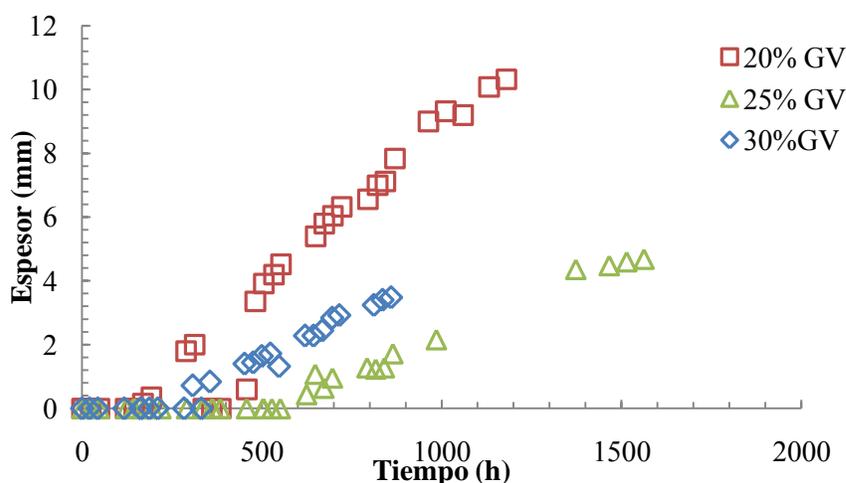


Figura 51. Cinéticas de espesor absoluto de clarificado de las emulsiones con diferentes concentraciones de grasa vegetal (GV).

Cuadro 34. Parámetros del modelo sigmoideal de la zona de clarificado para emulsiones base con diferentes concentraciones de grasa vegetal.

Concentración de grasa vegetal (%)	Espesor máx. (mm)		Sigmoidealidad		Tiempo medio (h)	
	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)
20	10.64 ^a	14.81	3.84	18.35	674.52 ^a	4.46
25*	1.54 ^b	0	4.57	0	958.54 ^b	0
30	4.90 ^c	7.49	3.38	8.15	596.09 ^a	21.41

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.4.2 Crema batida. Efecto de la concentración de grasa vegetal

3.4.2.1 Tiempo de batido y rendimiento

El tiempo de batido disminuyó conforme aumentó la concentración de grasa (Cuadro 35). De igual manera, el aumento de la grasa llevó a un incremento en el rendimiento de la crema batida, ya que al haber una mayor disponibilidad de grasa, la coalescencia parcial de los glóbulos de grasa aumenta como consecuencia de la alta prevalencia de cristales de grasa, capaces de sobresalir y perforar a través de los glóbulos adyacentes (Munk, y col., 2013), permitiendo una mayor incorporación de aire en menor tiempo.

Cuadro 35. *Tiempo de batido y rendimiento de la crema batida con diferentes concentraciones de grasa vegetal.*

Concentración de grasa vegetal (%)	Tiempo de batido (min)	Rendimiento (%)	C. V (%)
20	29	48.28 ^a	2.38
25	20	50.15 ^a	1.89
30	9.5	59.97 ^b	2.03

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.4.2.2 Densidad

En el caso de la densidad, las concentraciones de 20% y 25% no tuvieron influencia en la densidad. La concentración de 30% fue la que tuvo una mayor densidad, contrario a lo esperado, puesto que fue la que tuvo un mayor rendimiento (Cuadro 36).

Cuadro 36. Densidad de la crema batida con diferentes concentraciones de grasa vegetal.

Concentración de grasa vegetal (%)	Densidad (g/cm ³)	C. V. (%)
20	0.61 ^a	1.21
25	0.60 ^a	1.91
30	0.64 ^b	1.83

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.4.2.3 Tamaño de burbuja

El aumento en la concentración de grasa vegetal llevó a una disminución en el tamaño de burbuja de la crema batida (Cuadro 37), debido a una mayor formación de cadenas de grasa parcialmente coalescidas y también al aumento en la viscosidad de la fase continua, pues al haber una mayor viscosidad la incorporación de aire se hace de una manera más homogénea. En el análisis estadístico, las concentraciones de 25% y 30% no tuvieron una influencia significativa en el tamaño de burbuja de la crema batida, además al ser más estable no hay tanto crecimiento de burbujas.

Cuadro 37. Tamaño de burbuja para la crema batida con diferentes concentraciones de grasa vegetal.

Concentración de grasa vegetal (%)	Intervalo de diámetros de burbuja (μm)	Tamaño promedio de burbuja (μm)	C. V. (%)
20	51.61 – 96.41	78.20 ^a	20.02
25	40.15 – 87.25	62.22 ^b	21.10
30	34.42 – 85.12	58.15 ^b	25.77

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.4.2.4 Propiedades texturales

El incremento en la concentración de grasa vegetal aumentó la consistencia de la crema batida, como se puede observar claramente en la Figura 52, pues al haber más grasa

disponible hay un incremento en la cantidad de gotas de grasa parcialmente coalescida, provocando una mayor rigidez en la estructura de la crema batida. La fuerza adhesiva, la adhesividad y el estiramiento también aumentaron conforme aumentó la concentración de grasa vegetal, mientras tanto la untabilidad disminuyó conforme aumentó la concentración de grasa vegetal, ya que se requirió mayor fuerza para extender la crema batida (Cuadro 38). El análisis estadístico demostró que el incrementar la concentración de grasa, sí tiene una influencia significativa en las propiedades texturales de la crema batida.

Las mejores características de la crema batida con 30% de grasa vegetal, se pueden explicar debido a que, al haber una mayor cantidad de grasa, los glóbulos de grasa presentes en el sistema se incrementan, así como las redes de grasa parcialmente coalescidas que cubre a las burbujas de aire, dotando a la crema batida de una mayor consistencia y una mayor adhesividad.

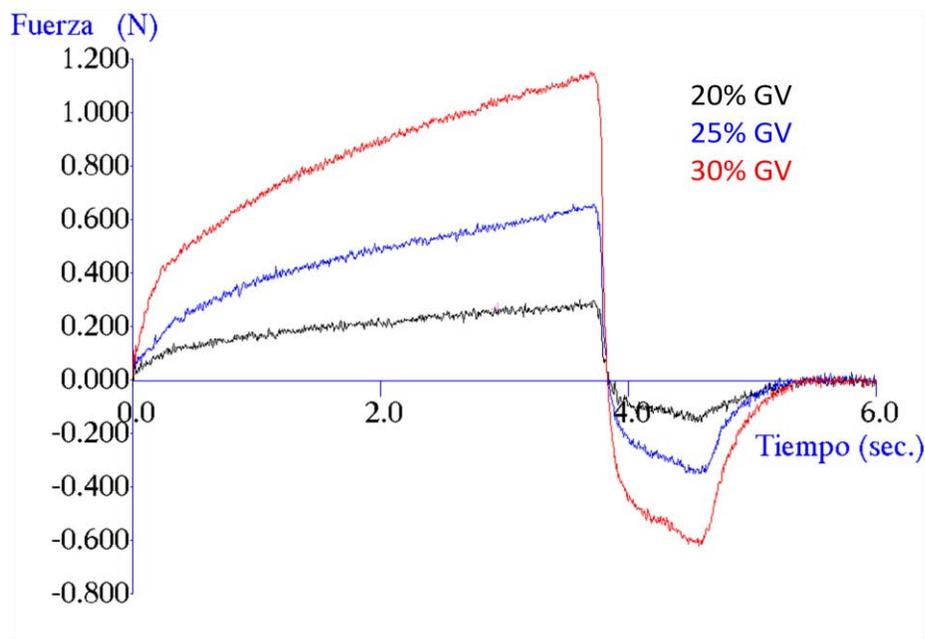


Figura 52. Curvas de adhesividad de las cremas batidas con diferentes concentraciones de grasa vegetal (GV).

Cuadro 38. *Parámetros obtenidos en la prueba de adhesividad para las cremas batidas con diferentes concentraciones de grasa vegetal.*

Concentración de grasa vegetal (%)	Consistencia (N)		Fuerza adhesiva (N)		Estiramiento (mm)		Adhesividad (N*s)		Untabilidad (mm/N)	
	Prom.	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)
20	0.31 ^a	2.48	-0.15 ^a	1.85	17.65 ^a	0.80	-0.12 ^a	10.4	-115 ^a	2.65
25	0.66 ^b	3.38	-0.35 ^b	2.72	17.65 ^a	0.17	-0.26 ^b	4.8	-51 ^b	2.82
30	1.16 ^c	4.61	-0.58 ^c	4.76	17.8 ^b	0.34	-0.50 ^c	9.3	-31 ^c	4.85

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.4.2.5 Estabilidad por transmisión-retrodispersión

La Figura 53 muestra las cinéticas de espesor de clarificado para las tres concentraciones de grasa vegetal, se observa un comportamiento muy similar, pues el clarificado inició al mismo tiempo y hasta 0.4 h se mantuvieron muy cercanas, y solamente en la crema con 25% de grasa vegetal el clarificado fue un poco más alto. Leser (1999) afirma que las emulsiones estables dan cremas batidas con una menor estabilidad.

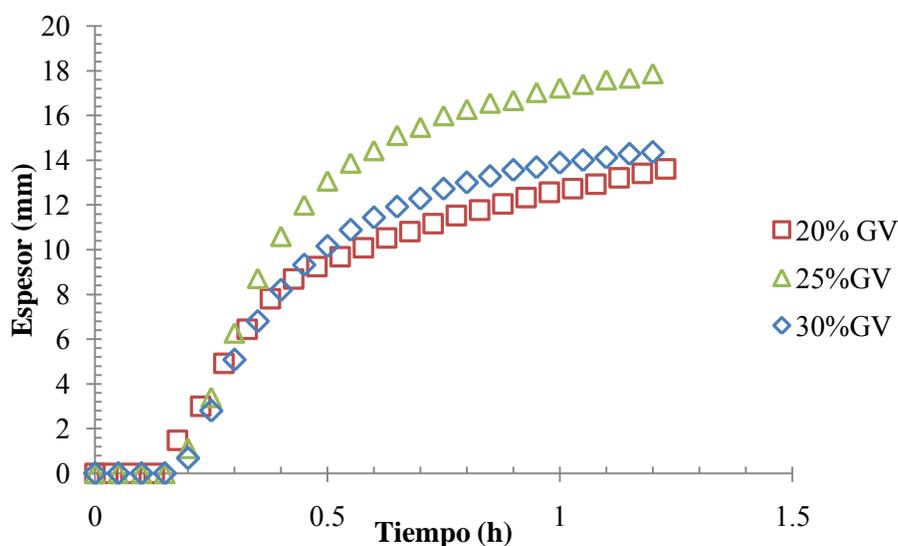


Figura 53. Cinética de espesor absoluto de clarificado para las cremas batidas a diferentes concentraciones de grasa vegetal (GV).

El análisis estadístico confirmó que en este caso el aumento de la grasa vegetal, no tiene una influencia significativa en el espesor de drenado, así como en el tiempo medio (Cuadro 39).

Cuadro 39. *Parámetros del modelo sigmoideal para el clarificado de la crema batida con diferentes concentraciones de grasa vegetal.*

Concentración de grasa vegetal (%)	Espesor máx. (mm)		Sigmoidealidad		Tiempo medio (h)	
	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)
20	11.12 ^a	31.32	2.56	1.79	0.47 ^a	31.74
25	15.79 ^a	16.64	3.33	4.56	0.46 ^a	27.89
30	13.93 ^a	4.27	2.20	67.55	0.51 ^a	37.38

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

Con base en los resultados obtenidos al variar la concentración de leche descremada, almidón lipofílico y grasa vegetal, se eligieron 8% de almidón lipofílico, 0.05% de goma xantana y 30% de grasa vegetal por haber producido mejores resultados en cuanto a rendimiento, textura y estabilidad de la crema batida, para estudiar el efecto de la concentración de concentrado de suero de leche (WPC) con 34% de proteína. Para no aumentar demasiado el contenido de sólidos lácteos, se disminuyó la concentración de leche descremada al 3%. Con esta formulación se estudió el efecto de la concentración de concentrado de suero de leche, en el objetivo 5.

3.5 Objetivo particular 5

3.5.1 Emulsión base. Efecto de la concentración de suero de leche

3.5.1.1 Comportamiento al flujo

En la Figura 54 se puede observar que el aumento en la concentración de suero de leche aumenta el esfuerzo de cizalla, de tal manera que la crema que requirió el mayor esfuerzo de cizalla fue la de 7%. La Figura 55 muestra que la viscosidad de la concentración al 7% es

mayor y disminuyó conforme aumentó la velocidad de cizalla, la concentración con 5% tuvo una menor viscosidad pero un comportamiento similar, mientras que la viscosidad de la emulsión con 3%, fue menor comparada con las otras dos.

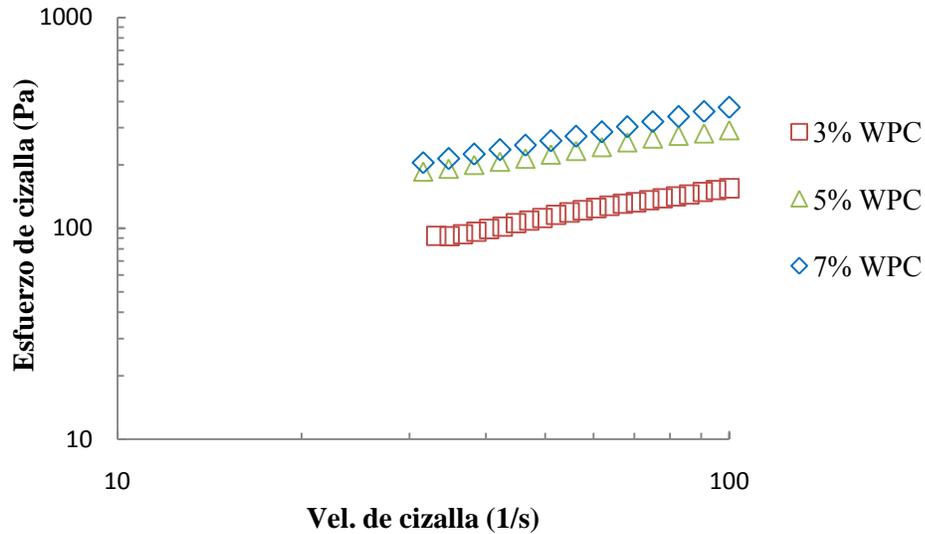


Figura 54. Curva de flujo de emulsiones con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche (WPC).

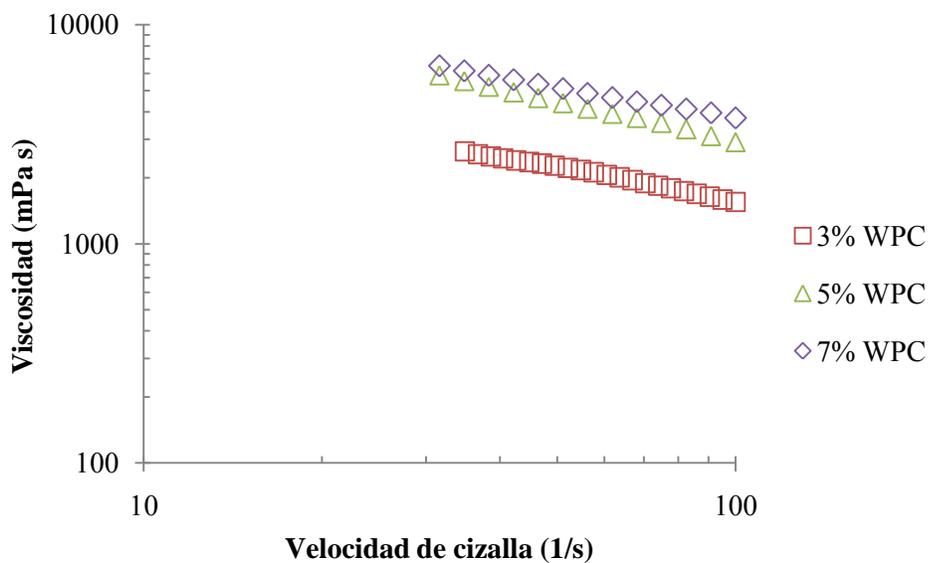


Figura 55. Curva de viscosidad para la emulsión con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche (WPC).

Hay dos puntos importantes que describen el por qué del cambio de la viscosidad al adicionar suero de leche a la emulsión base. Primero, estas proteínas tienen una alta capacidad para retener el agua, lo que lleva a un incremento en la viscosidad. En segundo, las proteínas del suero de leche se absorben fuertemente en la interfase, formando capas viscoelásticas adsorbidas, que conducen a una red de proteínas con alta viscosidad (Sajedi y col., 2013).

El Cuadro 40 muestra los parámetros reológicos obtenidos al aplicar el modelo de la potencia, para las tres concentraciones de concentrado de suero de leche, el índice de consistencia aumentó al incrementar la concentración de concentrado de suero de leche; por otro lado el índice de comportamiento al flujo tuvo muy poco cambio.

Cuadro 40. *Parámetros reológicos del modelo de la potencia de la emulsión base a diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.*

Concentración de suero de leche (%)	n	C. V.	k (Pa s ⁿ)	C. V.	R ²
3	0.48	4.81	15.6	8.32	0.996
5	0.46	11	29.5	12	0.997
7	0.50	3.13	35.73	0.42	0.997

El Cuadro 41 muestra las viscosidades a 30 s⁻¹ y 100 s⁻¹, junto con la comparación estadística. El análisis estadístico confirmó que el aumento en la concentración de suero de leche influyó de manera significativa en la viscosidad de la emulsión base, pues los valores obtenidos no fueron estadísticamente iguales.

Cuadro 41. *Viscosidades a dos velocidades de cizalla de las emulsiones base a diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.*

Concentración de suero de leche (%)	η_{30} (mPa s)	η_{100} (mPa s)
3	3600 ^a	1270 ^a
5	5263 ^b	2393 ^b
7	6250 ^c	3510 ^c

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.5.1.2 Tamaño de partícula

En la Figura 56 se muestran las curvas de distribución del tamaño de partícula, se puede observar que en las concentraciones de 3% y 5% el uso de ultrasonido no tuvo gran influencia en el tamaño de partícula, sin embargo, en 3% sí disminuyó ligeramente la densidad de distribución en el tamaño de 8 μm ; para 5% se observó un ligero desplazamiento de la curva con ultrasonido hacia tamaños más pequeños alrededor de 50 μm , la mayor densidad de distribución se encuentra alrededor del tamaño de partícula de 10 μm . Finalmente para 7% la curva presentó bi-modalidad la cual no desapareció con la aplicación del ultrasonido, pero el tamaño de partícula sí sufrió una disminución, la mayor densidad de distribución fue alrededor del tamaño de 20 μm .

Para la concentración de 3% los acumulados, antes del uso del ultrasonido, mostraron un tamaño de partícula entre 2 y 17 μm , los cuales sufrieron una ligera disminución después de aplicar el ultrasonido; en la concentración de 5% el tamaño de partícula oscila entre 2.2 y 17 μm , de igual manera, el ultrasonido no tiene una gran influencia en el tamaño de partícula; finalmente para la concentración de 7%, el tamaño de partícula estuvo entre 2 y 38 μm , en este caso el uso de ultrasonido redujo notablemente el tamaño de partícula en los diámetros medios y grandes de la emulsión base (Cuadro 42).

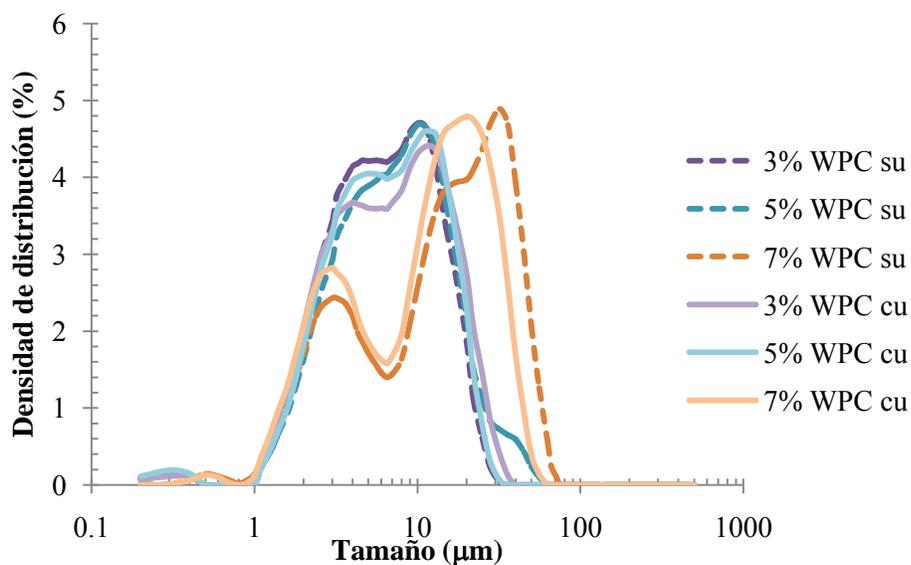


Figura 56. Distribución del tamaño de partícula con ultrasonido (c.u.) y sin el uso de ultrasonido (s.u.), para las diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.

El tamaño de partícula aumenta conforme se incrementa la concentración del concentrado de suero, se debe a la formación de aglomerados, ya que hay una gran cantidad de macromoléculas presentes en el sistema, éstos se deshacen con el ultrasonido. El análisis estadístico del diámetro promedio indica que entre 3 y 5% de concentrado de suero no hay diferencia.

Cuadro 42. *Tamaño de partícula de emulsiones base con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.*

Concentración de suero de leche (%)	Ultrasonido	10% acumulado (µm)	50% acumulado (µm)	90% acumulado (µm)	Diámetro promedio (µm)
3	Sin	2.12	6.09	16.27	7.80
	Con	2.03	5.95	14.54	7.31^a
	C. V.	3.63	17.98	14.51	15.02
5	Sin	2.2	6.80	17.6	8.88
	Con	2.07	6.13	15.28	7.58^a
	C. V.	0.97	3.18	3.65	3.09
7	Sin	2.26	14.28	37.61	17.39
	Con	2.07	9.64	24.60	11.52^b
	C. V.	2.53	7.05	15.94	10.94

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales. El C. V. es para el tamaño de partícula con ultrasonido.

3.5.1.3 Estabilidad. Transmisión retrodispersión de luz

La única emulsión que presentó desestabilización fue la de 5% de concentrado de suero de leche. Tanto en la Figura 57 como en el Cuadro 43 se puede observar que el espesor que alcanzó fue de 1.8 mm, y el tiempo medio fue de 920 h. Se puede decir que es una emulsión base relativamente estable.

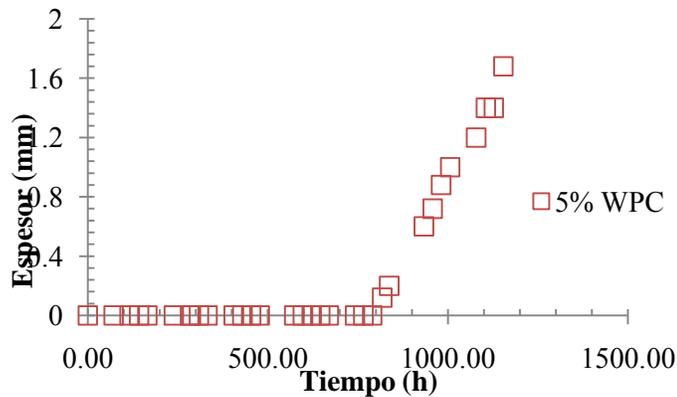


Figura 57. Cinética de espesor absoluto de clarificado de la emulsión a 5% de concentrado de suero de leche (WPC).

Cuadro 43. Parámetros del modelo sigmoideal para el clarificado de la crema batida con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.

Concentración de suero de leche (%)	Espesor máx. (mm)		Sigmoidealidad		Tiempo medio (h)	
	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)
5	1.82	7.62	19.8	47	920	10

Las concentraciones de 3% y 7%, no sufrieron una desestabilización, durante el tiempo que se realizaron las pruebas (1652 h), por lo que no se pudo obtener una cinética de desestabilización y sólo se presentan las gráficas que se obtienen directamente del Turbiscan (Figura 58 y Figura 59). Se puede ver en la parte de retrodispersión, que sólo hubo un ligero aumento del tamaño de partícula, mientras que la transmisión fue nula.

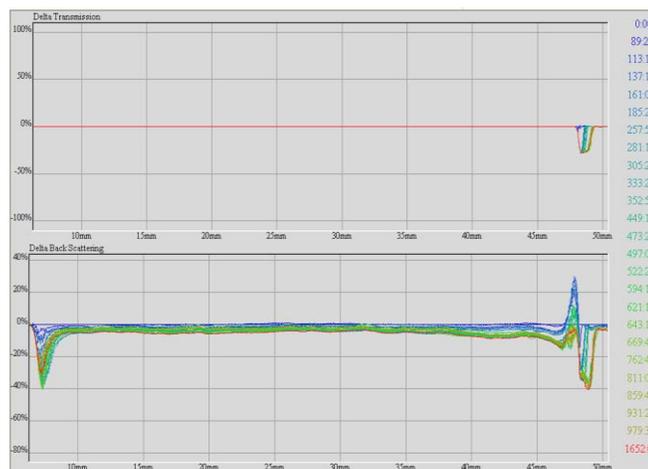


Figura 58. Gráficas de transmisión en modo de referencia para la concentración de 3% de concentrado de suero de leche (WPC).

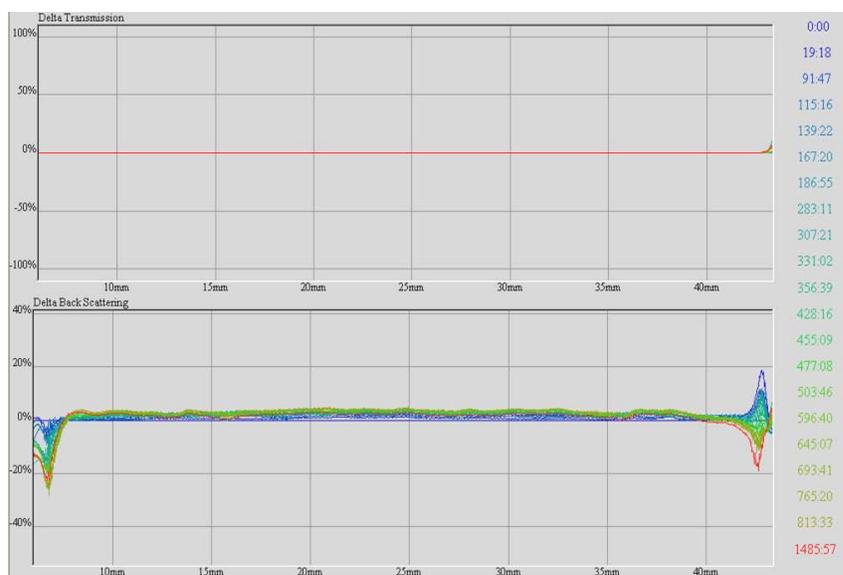


Figura 59. Gráficas de transmisión en modo referencia para la concentración de 7% de concentrado de suero de leche (WPC).

3.5.2 Crema batida. Efecto de la concentración de suero de leche

3.5.2.1 Tiempo de batido y rendimiento

El análisis estadístico de los datos mostró que la concentración de concentrado de suero de leche no tiene una influencia significativa en el rendimiento de la crema batida (Cuadro 44). El tiempo de batido aumentó conforme se incrementó la concentración de suero de leche, debido a que al haber una mayor cantidad de proteínas se necesitó más tiempo para poder desnaturalizarlas. Cabe destacar que los tiempos de batido fueron cortos y los rendimientos altos comparados con los obtenidos en objetivos anteriores.

Cuadro 44. Tiempo de batido y rendimiento de la crema batida con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.

Concentración de suero de leche (%)	Tiempo de batido (min.)	Rendimiento (%)	C. V. (%)
3	6.5	53.36 ^a	5.38
5	10	55.08 ^a	5.89
7	13	56.08 ^a	2.03

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.5.2.2 Densidad

El análisis estadístico mostró que el aumentar la concentración de concentrado de suero de leche no tuvo una influencia significativa en la densidad de la crema batida, ya que los datos obtenidos fueron estadísticamente iguales (Cuadro 45).

Cuadro 45. Densidad de la crema batida con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.

Concentración de suero de leche (%)	Densidad (g/cm ³)	C. V. (%)
3	0.64 ^a	3.91
5	0.66 ^a	2.76
7	0.66 ^a	0.54

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.5.2.3 Tamaño de burbuja

En este caso el tamaño de burbuja disminuyó conforme se aumentó la concentración de concentrado de suero de leche de 3% a 5% (Cuadro 46). Ésto debido a que en la estructura de la crema batida hay proteínas del suero de la leche, junto con grasa parcialmente coalescida, lo que provoca que la estructura sea más fuerte y que al batir no se forman burbujas de tamaños muy grandes. De acuerdo con el análisis estadístico, el aumento de la concentración de 5% a 7%, no tuvo una influencia significativa en el tamaño de burbuja.

Cuadro 46. Promedios de los diámetros de burbuja para las diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.

Concentración de suero de leche (%)	Intervalo de diámetros de burbuja (μm)	Diámetro promedio (μm)	C. V. (%)
3	33.64 – 88.19	61.67 ^a	25.31
5	32.84 – 78.95	51.61 ^b	26.58
7	29.19 – 68.56	49.03 ^b	23.22

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.5.2.4 Propiedades texturales

En la Figura 60 se puede observar que hay una mínima diferencia en la consistencia de las cremas batidas con concentraciones de 3% y 5% de concentrado de suero de leche, por lo que el aumentar la concentración a 5% no influyó en los parámetros texturales obtenidos en la prueba de adhesividad por penetración y retirada de las cremas batidas. Sin embargo, al aumentar la concentración a 7%, estos parámetros sufren un aumento considerable, por lo que se vieron beneficiados con esta concentración, esto es confirmado por el análisis estadístico (Cuadro 47). La fuerza adhesiva y la adhesividad aumentan cuando se incrementa la concentración de concentrado de suero de leche a 7%, mientras que la untabilidad sufre una disminución (Cuadro 47).

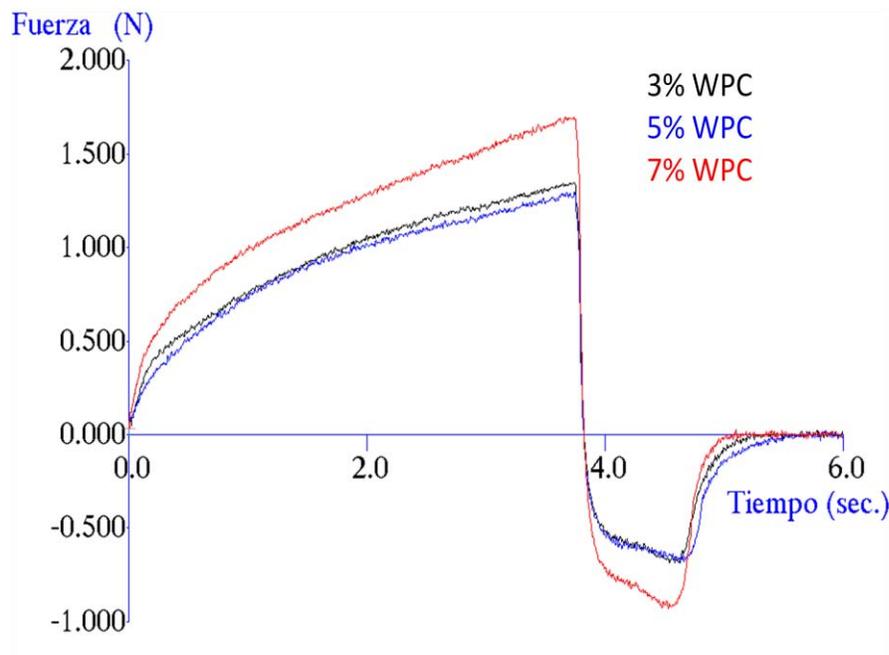


Figura 60. Curvas de adhesividad para la crema batida con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche (WPC).

Cuadro 47. *Parámetros obtenidos en la prueba de adhesividad para las cremas batidas con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche*

Concentración de suero de leche (%)	Consistencia (N)		Fuerza adhesiva (N*s)		Estiramiento (mm)		Adhesividad (N*s)		Untabilidad (mm/N)	
	Prom	C.V. (%)	Prom	C.V. (%)	Prom	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)	Prom.	C.V. (%)
3	1.37 ^a	2.82	-0.69 ^a	3.45	17.81 ^a	0.19	-0.57 ^a	4.60	-25.7 ^a	3.40
5	1.33 ^a	5.77	-0.71 ^a	6.78	17.83 ^a	0.15	-0.62 ^a	6.67	-25.2 ^a	6.71
7	1.69 ^b	5.08	-0.92 ^b	5.62	17.83 ^a	0.15	-0.78 ^b	11.2	-19.5 ^b	5.55

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.5.2.5 Estabilidad. Transmisión-retrodispersión de luz

En la Figura 61 se observa que en la crema batida con 7% de concentrado de suero de leche se inicia el clarificado un poco más tarde que las concentraciones de 3 y 5% y también que la forma de las curvas es muy similar.

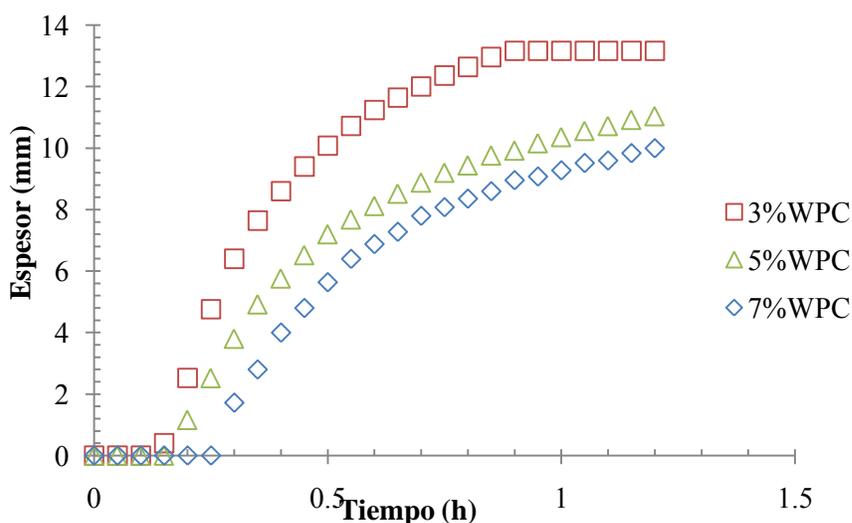


Figura 61. Cinética de espesor absoluto de clarificado de las cremas batidas a diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche (WPC).

En este caso el análisis estadístico mostró que el aumento en la concentración de suero de leche no tuvo una influencia significativa en el espesor de clarificado, ni en el tiempo medio

para alcanzar dicho espesor. Sin embargo, se puede decir que la concentración más estable fue la de 7%, ya que fue la que más tiempo se tardó en drenar, aún cuando estadísticamente no había diferencia.

Cuadro 48. *Parámetros del modelo sigmoideal para el drenado de la crema batida con diferentes concentraciones de concentrado de suero de leche.*

Concentración de suero de leche (%)	Espesor máx. (mm)		Sigmoidealidad		Tiempo medio (h)	
	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)
3	13.46 ^a	10.49	2.88	4.58	0.34 ^a	7.85
5	11.60 ^a	4.08	2.79	6.59	0.38 ^a	12.24
7	11.37 ^a	11.43	3.46	5.48	0.40 ^a	16.43

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

3.5.2.6 Prueba de extrusión para las cremas más estables

La prueba de extrusión se realizó por que imita las condiciones a las cuales se someten las cremas batidas, ya que sufren diferentes deformaciones durante su uso, pues al ser utilizadas en el área de repostería se necesita que sean manejables sin que su estructura se vea afectada.

En cuanto a la prueba de extrusión se eligió la formulación más estable, con mayor rendimiento y consistencia, pero sin suero de leche (30% grasa, 8% almidón, 0.05% xantana, 5% leche descremada), para compararla con la formulación con las características mencionadas anteriormente pero con suero de leche (7%). Se puede observar tanto en el Cuadro 49 como en la Figura 62, que el adicionarle suero de leche a la emulsión base, aumenta los parámetros de extrusión, como son la resistencia que opone la crema batida, el trabajo de extrusión, la fuerza de extrusión y la fuerza máxima que se obtiene. Los parámetros aumentan debido a que hay una mayor presencia de proteínas desnaturizadas estabilizando los glóbulos de grasa, por lo que la red formada por estos componentes alrededor de las burbujas de aire, tiene una mayor fuerza.

Cuadro 49. *Parámetros de extrusión para las cremas batidas.*

	Resistencia (N/s)		Trabajo de extrusión (N s)		Fuerza de extrusión (N)		Fuerza máxima (N)	
	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)	Promedio	C. V. (%)
0%WPC 30%GV	20.63 ^a	6.37	24.15 ^a	3.50	6.85 ^a	3.59	7.19 ^a	4.54
7%WPC 30%GV	21.20 ^b	16.43	28.85 ^b	9.25	8.51 ^b	3.67	9.01 ^b	3.16

Nota: con $\alpha=0.05$, para una prueba de Tukey los valores con el mismo superíndice son estadísticamente iguales.

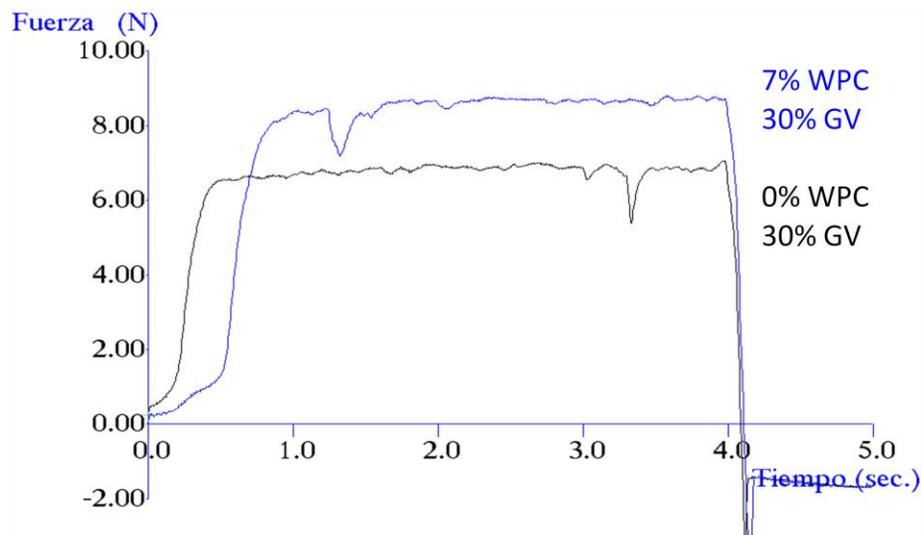


Figura 62. Comparación de graficas de extrusión para crema batida.

3.6 Comparación de todos los objetivos.

El Cuadro 50, muestra los resultados más relevantes de las emulsiones estudiadas en cada objetivo; al comparar los cinco objetivos, se destaca que la emulsión base con una mayor viscosidad (a la mínima y máxima velocidad de cizalla) fue la de 7% de concentrado de suero de leche, mientras que la de mayor tamaño de partícula fue la de 12% de almidón y la de menor tamaño fue la de 0.1% de goma xantana, finalmente las más estable fueron las de 3% y 7% de suero de leche, pues no presentaron clarificado.

El tamaño de partícula de las emulsiones con 20% de grasa vegetal osciló entre 4.16 μm y 7.85 μm , la emulsión que se salió de este intervalo fue la de 12%, ya que como se mencionó anteriormente fue la menos estable, por lo tanto la floculación y la coalescencia formaron partículas de mayor tamaño. Al aumentar la concentración de grasa se obtienen diámetros promedio mayores que van desde 7.3 a 11.5 μm . En cuanto al espesor de clarificado las emulsiones con 20% de grasa vegetal se encuentran en el intervalo de 1.3 a 11.5 mm, los cuales disminuyen notablemente con el aumento de la concentración de grasa pues pasan a un intervalo entre 0 y 5 mm (Cuadro 50).

En el Cuadro 51 se muestran los resultados más relevantes de las cremas batidas estudiadas, se puede destacar que la crema batida con un mayor rendimiento fue la de 30% grasa vegetal seguida por la de 7% de suero; la de menor tamaño de burbuja, una mayor dureza y por lo tanto una menor untabilidad, fue la de 7% de suero de leche.

Se puede destacar que los tiempos de batido para cremas batidas con 20% de grasa se encontraban entre 16 y 39 min, estos disminuyeron (entre 6.5 y 20 min) al aumentar la concentración de grasa. El rendimiento aumentó notablemente cuando se incrementó la concentración de grasa, pues se obtuvieron rendimientos superiores al 50%. La densidad, contrario a lo esperado, se incrementó junto con la concentración de grasa. Los diámetros promedio de burbuja disminuyeron con el aumento de la grasa (Cuadro 51).

La consistencia sufrió una notable mejoría con el incremento de la concentración de grasa, pues se obtuvieron valores entre 1.16 y 1.7 N. La crema batida más estable fue la de 0% de goma xantana, pero su rendimiento fue bajo y su consistencia no fue la deseada para una crema batida; la más inestable fue la de 0.1% de goma xantana. Las cremas batidas con 30% de grasa vegetal tuvieron buena estabilidad y mejores características texturales destacando la de 7% de suero de leche como la de mejor rendimiento, propiedades texturales y estabilidad (Cuadro 51).

Cuadro 50. Comparación de los resultados más relevantes de la emulsión base.

Formulación	η_{30} (mPa s)	η_{100} (mPa s)	Tamaño partícula (μm)	Espesor de clarificado (mm)	Tiempo medio (h)
0.05% Goma xantana 8% Almidón 20% Grasa vegetal 5% Leche descremada (base)	120	120	5.28	10.64	674
Objetivo 1. 0% Goma xantana	139.67	112.67	6.93	1.30	931
Objetivo 1. 0.1% Goma xantana	279.67	223	4.16	4.54	815
Objetivo 2. 6% Almidón	100	100	7.85	11.55	480
Objetivo 2. 12% Almidón	1600	910	22.52	6.18	178
Objetivo 3. 7.5% Leche descremada	3340	2490	5.52	2.8	1090
Objetivo 4. 25% Grasa vegetal	514	378	10.88	1.54	958
Objetivo 4. 30% Grasa vegetal	2050	1090	9	4.9	596
Objetivo 5. 3% Concentrado de suero de leche	3600	1270	7.31	-	-
Objetivo 5. 5% Concentrado de suero de leche	5263	2393	7.58	1.82	920
Objetivo 5. 7% Concentrado de suero de leche	6250	3510	11.52	-	-

Cuadro 51. Comparación de los resultados más relevantes de la crema batida.

Formulación	Tiempo de batido (min)	Rendimiento (%)	Densidad (g/cm ³)	Tamaño burbuja (µm)	Consistencia (N)	Untabilidad (mm/N)	Clarificado (mm)	Tiempo medio (h)
0.05% Goma xantana 8% Almidón 20% Grasa vegetal 5% Leche descremada (Base)	29	48.27	0.61	78.2	0.30	112.36	11.12	0.47
Objetivo 1. 0% Goma xantana	29	47.46	0.63	136.32	0.18	176.94	11.7	0.66
Objetivo 1. 0.1% Goma xantana	27	37.11	0.61	58.81	0.31	98.17	26.66	0.52
Objetivo 2. 6% Almidón	21	44.5	0.61	143.06	0.40	83.46	11.45	0.41
Objetivo 2. 12% Almidón	11	39.55	0.64	76.92	0.71	45.87	12.81	0.56
Objetivo 3. 7.5% Leche descremada	39	39.4	0.61	70.28	0.31	106.3	17.88	0.52
Objetivo 4. 25% Grasa vegetal	20	50.15	0.60	62.22	0.66	51.21	15.79	0.46
Objetivo 4. 30% Grasa vegetal	9.5	59.97	0.64	58.15	1.16	30.55	13.93	0.51
Objetivo 5. 3% suero de leche	6.5	53.36	0.64	61.67	1.37	25.75	13.46	0.34
Objetivo 5. 5% suero de leche	10	55.08	0.66	51.61	1.33	25.16	11.6	0.38
Objetivo 5. 7% suero de leche	13	56.08	0.66	49.03	1.69	19.53	11.37	0.40

En la Figura 63 se muestran todas las cinéticas de espesor máximo de drenado para las emulsiones base, no se presentan las emulsiones de 3% y 7% ya que no presentaron clarificado; se puede observar que las emulsiones que se tardaron más en drenar y tuvieron un menor espesor fueron las de 25% de grasa vegetal y la de 5% suero de leche, ya que fueron las que más tiempo se tardaron en comenzar el clarificado. La emulsión base con 12% almidón lipofílico, tuvo un mayor espesor de clarificado en un menor tiempo.

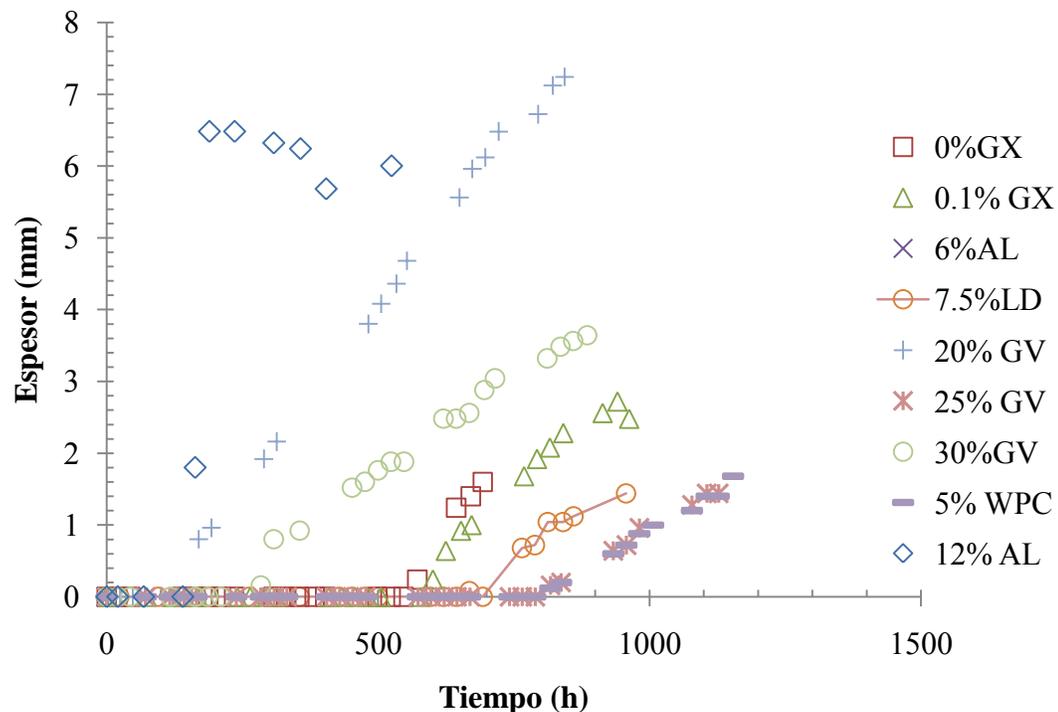


Figura 63. Comparación de las cinéticas de clarificado de todas las emulsiones base, donde GX es goma xantana, AL almidón lipofílico, LD leche descremada, GV grasa vegetal y WPC suero de leche.

La Figura 64 muestra la comparación de todas las cinéticas de espesor de clarificado de las cremas batidas, se puede observar que la crema batida que tardó más tiempo en comenzar a drenar fue la de 12% de almidón lipofílico, seguida de la concentración de 7% de concentrado de suero de leche. La crema batida que alcanza un mayor espesor de drenado fue la de 0.1% de goma xantana; mientras que la que comienza primero el drenado es la de 6% de almidón lipofílico.

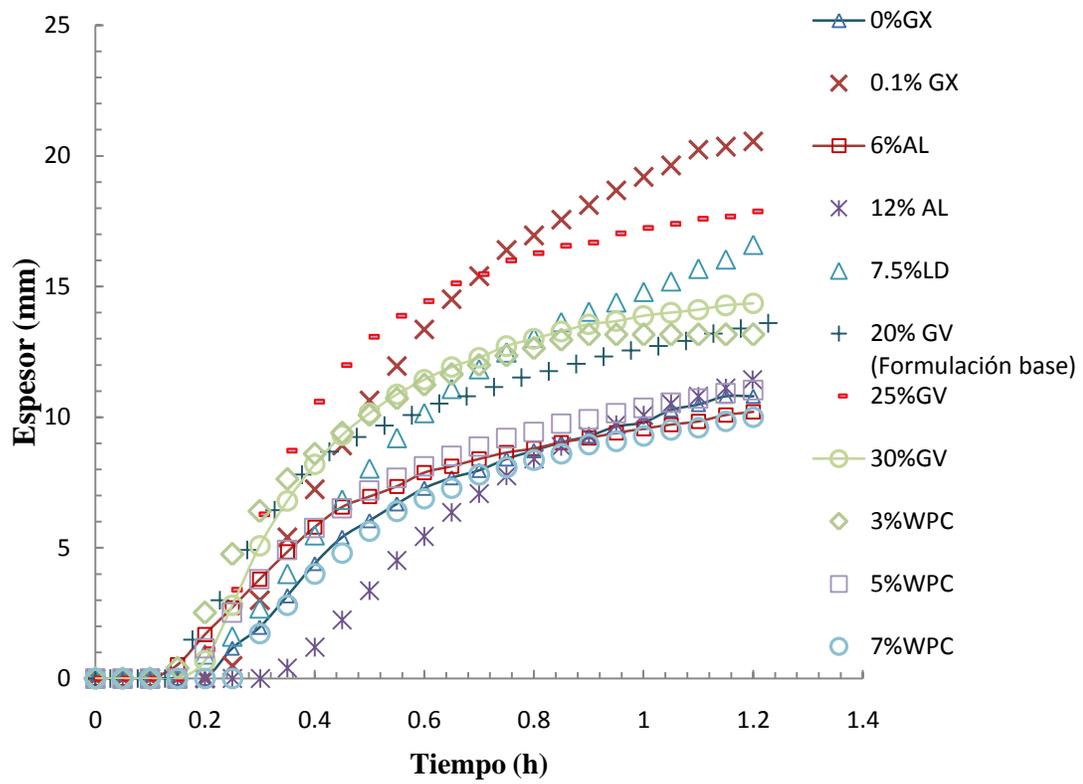


Figura 64. Comparación de las cinéticas de clarificado de todas las cremas batidas, donde GX es goma xantana, AL almidón lipofílico, LD leche descremada, GV grasa vegetal y WPC suero de leche.

CONCLUSIONES

Después de evaluar tanto las emulsiones base como las cremas batidas, se puede concluir que al aumentar la concentración de goma xantana, la que tenía 0.05%, fue la emulsión base menos estable, por lo que se obtuvo una crema batida con mayor rendimiento, consistencia y estabilidad; mientras que el uso de una concentración mayor no benefició a la crema batida; no agregar goma xantana al sistema benefició su estabilidad, pero se obtuvieron cremas batidas con una consistencia muy baja no característica de una crema batida.

Una vez evaluada la influencia del almidón lipofílico tanto en las emulsiones base como en las cremas batidas, se concluye que la concentración de 8%, produjo la emulsión base más estable y la crema batida que mayor rendimiento tuvo y aunque la concentración de 12% tuvo mayor consistencia, el rendimiento y la estabilidad fueron menores, por lo que aumentar la concentración de almidón lipofílico hasta 12% no resultó benéfico.

El aumento de la concentración de leche descremada no significó un beneficio para la crema batida, pues las propiedades que se evaluaron (texturales, físicas y de estabilidad), no presentaron mejoría, al contrario la estabilidad disminuyó y las propiedades texturales no presentaron cambios significativos.

El aumento de la grasa vegetal significó un aumento notable de las propiedades físicas, texturales y de estabilidad de las cremas batidas, de tal manera que la concentración más alta (30%), fue la que presentó las mayores propiedades de textura y estabilidad, de todas las cremas batidas sin suero de leche. Lo que significa que el aumento de la grasa, fue el factor que más influencia tuvo en la crema batida.

El hecho de haberle agregado suero de leche, así como el aumento de la concentración incrementó las propiedades (físicas, texturales y estabilidad), de la crema batida y de las emulsiones base. Con la concentración de 7%, se obtuvo una crema batida con un mayor rendimiento, consistencia y estabilidad, de todas las formulaciones.

Finalmente, con base a los resultados obtenidos se puede concluir que, el almidón lipofílico cumple con la función de desplazar a la proteína de la interfase y producir la coalescencia parcial de los glóbulos de grasa, lo que lo hace una opción frente a los EBPM.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, K., Murray, B. S., Dickinson, E. (2008). Whipped cream-like textured systems based on acidified caseinate-stabilized oil-in-water emulsions. *International Dairy Journal* (22), 690-699.
- Almonaci, J., Casas, N. B., Fuentes, M. E. (2013). Efecto de la agitación mecánica controlada y la composición en las propiedades reológicas, texturales y estabilidad de cremas vegetales. *Memorias del XXXIV Encuentro Nacional y III Congreso Internacional de la AMIDIQ*. Mazatlán, México.
- Arbolea, J. C., Ridout, M., Wilde, P. (2009). Rheological behavior of aerated palm kernel oil/water emulsions. *Food Hydrocolloids* (23), 1358-1365.
- Badui, S. (2006). *Química de los alimentos* (2ª ed.). México: Alhambra Mexicana.
- Borcherding, K., Lorenzen, P., Hoffmann, W., Schrader, K. (2008). Effect of foaming temperature and varying time/temperature-conditions of pre-heating on foaming properties of skimmed milk. *International Dairy Journal* (18), 349-358.
- Camacho, M. M., Martínez-Navarrete, N., Chiralt, A. (1998). Influence of locust bean gum/l carrageenan mixtures on whipping and mechanical properties and stability of dairy creams. *Food Research International* (31), 653-658.
- Casas, N. B. (2013a). Curso de crema batida. 55-56. *Documento interno de LAPRYFAL*. Cuautitlán Izcalli, México
- Casas, N. B. (2013b). Manual de uso rápido Turbiscan MA2000. *Documento interno de LAPRYFAL*, 2-15. Cuautitlán Izcalli, México.
- Casas, N. B. (2013c). Curso de Textura. *Documento interno de LAPRYFAL*. Cuautitlán Izcalli, México.
- Castillo-Castañeda, E., Courtois, F., Relkin, P. (2006). Cuantificación de la persistencia y homogeneidad de espumas mediante procesamiento de imágenes. *Ciencia y Tecnología Alimentaria* (5), 147-155.
- Chang, Y., Hartel, R. (2002). Measurement of air cell distributions in dairy foams. *International Dairy Journal* (12), 463-472.
- Chiralt, B. A. (1998). *Laboratorio de coloides en alimentos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Servicio de publicaciones.

- Cilas. (2013). Recuperado el 11 de Septiembre de 2013, de <http://www.cilas.com/laser-diffraction-particle-size-analysis-principles.htm>
- Codex stan 288-1976 (1976). Norma del codex para las cremas y las cremas preparadas. *Codex Alimentarius* .
- Cubero, N., Albert, M., Jordi, V. (2002). *Aditivos alimentarios*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Dalgleish, D. G. (2006). Food emulsions-their structures and structure-forming properties. *Food Hydrocolloids* (20), 415-422.
- Delgado, V. (2009). Manual de uso rápido de la termobalanza. *Documento interno de LAPRYFAL*. México.
- Dokic, L., Krstonosic, V., Nikolic, I. (2012). Physicochemical characteristics and stability of oil-in-water emulsions stabilized by OSA starch. *Food Hydrocolloids* (29), 185-192.
- Donz, E., Boiron, P., Courthaudon, J. L. (2014). Characterization of industrial dried whey emulsions at different stages of spray-drying. *Journal of Food Engineering* (126), 190-197.
- Drelon, N., Gravier, E., Daheron, L., Boisserie, L., Omari, A., Leal-Calderon, F. (2006). Influence of tempering on the mechanical properties of whipped cream. *International Dairy Journal* (16), 1454–1463.
- Dunnewind, B., Janssen, A. M., Van Vliet, T., Weenen, H. (2004). Relative importance of cohesion and adhesion for sensory stickiness of semisolid foods. *Journal of Texture Studies* (35), 603-620.
- Dutta, A., Chengara, A., Nikolov, A., Wason, D., Chen, K., Campbell, B. (2004). Desestabilization of aerated food products: effects of Ostwald ripening and gas diffusion. *Journal of Food Engineering* (62), 177-184.
- Dybowska, B. E. (2011). Whey protein-stabilized emulsion properties in relation to thermal modification of the continuous phase. *Journal of Food Engineering* (104), 81-88.
- Eisner, M., Wildmoser, H., Windhab, E. J. (2005). Air cell microstructuring in high viscous ice cream matrix. *Colloids and Surfaces* (263), 390-399.
- Euston, S., Finnigan, S., Hirst, R. (2001). Aggregation kinetics of heated whey protein-stabilised emulsions: effect of low molecular weight emulsifiers. *Food Hydrocolloids* (15), 253-262.

- Fennema, O. R. (2002). *Introducción a la ciencia de los alimentos*. México: Acribia.
- Gabriele, D., Migliori, M., Di Sanzo, R., Oliviero, C., Ruffolo, S. A., B., d. C. (2009). Characterisation of dairy emulsions by NMR and rheological techniques. *Food Hydrocolloids* (23), 619-628.
- Gil, A. (2010). *Preelaboración y conservación de alimentos*. Madrid: Ediciones Akal.
- Graham, H. D. (1977). *Food Colloids*. Connecticut: The AVI Publishing Company.
- Green, A., Littlejohn, K., Hooley, P., Cox, P. (2013). Formation and stability of food foams and aerated emulsions: hydrophobins as novel functional ingredients. *Current Opinion in Colloid and Interface Science* (18), 292-301.
- Gunstone, F. D. (2002). *Vegetable oils in food technology. Composition, properties and uses*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Gunstone, F. G. (2006). *Modifying lipids for use in food*. Cambridge: CRC Press.
- Hotrum, N., Cohen, M., Van Vliet, T., Van Aken, G. (2004). Spreading of partially crystallized oil droplets on an air/water interface. *Colloids and Surfaces* (240), 83-92.
- Jakubczyc, E., & Niranjana, K. (2006). Transient development of whipped cream properties. *Journal of Food Engineering* (77), 79-83.
- Kim, H., Bot, A., de Vries, I., Golding, M., Pelan, E. (2013). Effects of emulsifier on vegetable-fat based aerated emulsions with interfacial rheological contributions. *Food Research International* (53), 342-351.
- Lawson, H. (1994). *Aceites y grasas alimentarios. Tecnología, utilización y nutrición*. Zaragoza, España: Acribia.
- Leal-Calderon, F., Thivilliers, F., Schmitt, V. (2007). Structured emulsions. *Colloid and Interface Science* (12), 206-212.
- Leser, M. E., Michel, M. (1999). Aerated milk protein emulsions- new microstructural aspects. *Current Opinion in Colloid and Interface Science* (4), 239-244.
- Li, C., Fu, X., Luo, F., Huang, Q. (2013). Effects of maltose on stability and rheological properties of orange oil-in-water emulsion formed by OSA modified starch. *Food Hydrocolloids* (32), 79-86.
- Márquez, A. L., Palazolo, G. G., Wagner, J. R. (2005). Emulsiones tipo crema preparadas a base de leche de soja 2: Efecto de la agitación controlada sobre la reología de la cremas. *Grasas y Aceites* (56), 89-95.

- Martínez, L. (2013). Guía de uso rápido de Reometro MCR1. *Documento interno de LAPRYFAL*. Cuautitlán Izcalli, México.
- Mc Clements, D. J. (2004). *Food emulsions: principles, practice, and techniques* (2^a ed.). New York: CRC Press.
- Müller-Fischer, N., Windhab, E. (2005). Influence of process parameters on microstructure of food foam whipped in a rotor-stator device within a wide static pressure range. *Colloids and Surfaces* (263), 353-362.
- Munk, M. B., Marangoni, A. G., Ludvigsen, H. K., Norn, V., Knudsen, J. C., Risbo, J. (2013). Stability of whippable oil-in-water emulsions: Effect of monoglycerides on crystallization of palm kernel oil. *Food Research International* , 1738-1745.
- Muñoz, J., Alfaro, M. C., Zapata, I. (2007). Avances en la formulación de emulsiones. *Grasas y Aceites* (58), 64-73.
- NOM-185-SSA1-2002. (2002). Productos y servicios. Mantequilla, cremas, producto lácteo condensado azucarado, productos lácteos fermentados y acidificados, dulces a base de leche. Especificaciones sanitarias. *Norma Oficial Mexicana* .
- Pasquel, A. (2010). Gomas: una aproximación a la industria de alimentos. *Mundo alimentario* (35), 6-12.
- Patiño, M. (2010). *Química básica. Prácticas de laboratorio* (Segunda ed.). Medellín, Colombia: Instituto Tecnológico Metropolitano.
- Pérez, A., Carrera, C., Rodríguez, J. M., Rubiolo, A., Santiago, L. (2010). Milk whey proteins and xanthan gum interactions in solution and at the air–water interface: A rheokinetic study. *Colloids and Surfaces* (81), 50-57.
- Prentice, J. H. (1992). *Dairy rheology*. New York: VCH.
- Raharitsifa, N., Genovese, D., Ratti, C. (2006). Characterization of apple juice foams for foam-mat drying prepared with egg white protein and methylcellulose. *Journal of Food Science* (71), 142-151.
- Raymundo, A., Empis, J., Sousa, I., Gallegos, C., Franco, J. (2001). Influencia de la relación proteína de altramuz/tensioactivo en las propiedades de flujo y texturales de emulsiones aceite en agua. *Grasas y Aceites* (52), 235-240.
- Relkin, P., Sourdet, S. (2005). Factors affecting fat droplet aggregation in whipped frozen protein-stabilized emulsions. *Food Hydrocolloids* (19), 503–511.
- Revilla, A. (1982). *Tecnología de la leche*. México: Textos.

- Rosseau, D. (2000). Fat crystals and emulsion stability-a review. *Food Research International* (33), 3-14.
- Sajedi, M., Nasirpour, A., Keramat, J., Desobry, S. (2013). Effect of modified whey protein concentrate on physical properties and stability of whipped cream. *Food Hydrocolloids*. (36), 93-101.
- Salager, J. L., Andérez, J. M., Forgiarini, A. (1999). Influencia de la formulación sobre las espumas. *Borrador del Cuaderno FIRP* (263), 1-14.
- Sharma, B. D. (2006). The xantan gum in the food industry. *Food Promotion Chronicle* (5), 27-30.
- Singh, H. (2011). Aspects of milk-protein-stabilised emulsions. *Food Hydrocolloids* (25), 1938-1944.
- Smith, A., Goff, H., Kakuda, Y. (2000). Microstructure and rheological properties of whipped cream. *International Dairy Journal* (10), 295-301.
- Stanley, D., Goff, H., Smith, A. (1996). Texture-Structure relationships in foamed dairy emulsions. *Food Research International* , 1-13.
- Sweedman, M., Tizzotti, M. J., Schäfer, C., Gilbert, R. (2013). Structure and physicochemical properties of octenyl succinic anhydride modified starches; a review. *Carbohydrate Polymers* (92), 905-920.
- Tcholakova, S., Denkov, N., I., I., Campbell, B. (2006). Coalescence stability of emulsions containing globular milk proteins. *Advances in Colloid and Interface Science* (123), 259–293.
- Thanasukarn, P., Pongsawatmanit, R., McClements, D. (2004). Influence of emulsifier type on freeze-thaw stability of hydrogenated palm oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids* (18), 1033-1043.
- Van Aken, G. A. (2001). Aeration of emulsions by whipping. *Colloids and Surfaces* (190), 333-354.
- Van Lent, K., Le, C., Vanlerberghe, B., Van der Meeren, P. (2008). Effect of formulation on the emulsion and whipping properties of recombined cream. *International Dairy Journal* (18), 1003-1010.
- Vega, C. (2006). Diseño de microestructura en crema batida. *Mundo Lácteo y Cárnico*, 12-18.

- Ye, A., Hemar, Y., Singh, H. (2004). Enhancement of coalescence by xanthan addition to oil-in-water emulsions formed with extensively hydrolysed whey proteins. *Food Hydrocolloids* (18), 737–746.
- Zhao, Q., Zhao, M., Yang, B., Cui, C. (2009). Effect of xanthan gum on the physical properties and textural characteristics of whipped cream. *Food Chemistry* (116), 624-628.

ANEXO 1

El cabezal de lectura que se mueve a lo largo de una celda de vidrio, de fondo plano, toma lecturas de la luz transmitida o retro dispersa cada 40 mm en una altura de muestra máxima de 80 mm. El barrido se puede repetir con una frecuencia programable para obtener una huella digital macroscópica de la muestra. Detector de transmisión (T), recoge la luz transmitida a través de la disolución en el tubo, a 0°. Detector de retro dispersión (BS), recibe la luz retro dispersa por el producto a 135°.

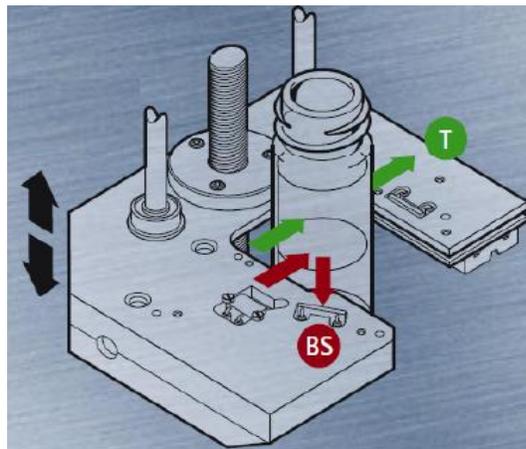
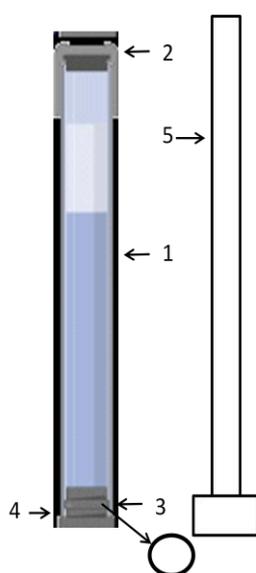


Figura 65. Esquema del modo de operación del Turbiscan.

La muestra se almacena en un tubo como el siguiente:



1. Tubo de vidrio borosilicato abierto de ambos extremos (140 mm de longitud).
2. Tapón superior con rosca de cierre.
3. Sello hermético („o” ring).
4. Tapón inferior negro de teflón (absorbente de luz).
5. Botador largo.

El tapón superior tiene una muesca con la finalidad de que embone con un perno en la apertura para el tubo del instrumento de manera que siempre se escanee en la misma posición.

Figura 66. Celda de medición.