

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DEFINICIÓN DE VARIABLES DE COMPOSICIÓN, FORMULACIÓN Y MEZCLADO PARA LA FORMACIÓN DE EMULSIONES ALIMENTICIAS O/W DE CONTENIDO REDUCIDO DE ACEITE

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Sepúlveda Medialdea, Vanessa
Para optar al título de Ingeniero Químico

Caracas, 2006.



TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DEFINICIÓN DE VARIABLES DE COMPOSICIÓN, FORMULACIÓN Y MEZCLADO PARA LA FORMACIÓN DE EMULSIONES ALIMENTICIAS O/W DE CONTENIDO REDUCIDO DE ACEITE

Tutor académico: Prof. Freddy Méndez.
Tutor industrial: Ing. Carolina Blanco.

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Sepúlveda Medialdea, Vanessa
Para optar al título de Ingeniero Químico

Caracas, 2006.

Caracas, Noviembre de 2006.

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Vanessa Sepúlveda Medialdea, titulado:

“Definición de variables de composición, formulación y mezclado para la formación de emulsiones alimenticias O/W de contenido reducido de aceite”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



The image shows the signatures of four individuals and an official circular stamp. The stamp is from the 'REPUBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA' and the 'Facultad de Ingeniería'. It also mentions 'Escuela de Ingeniería Química' and 'DIRECCION DE INGENIERIA QUIMICA'. The names and titles are as follows:

- Prof. José Sorrentino, Jurado
- Prof. Nólides Guzmán, Jurado
- Prof. Freddy Méndez, Tutor Académico
- Ing. Carolina Blanco, Tutor Industrial

DEDICATORIA

A ti ***Claudia***, por tu sonrisa infinita, por tu más bella creación... Camila, por tu amor a la medicina, por todo tu conocimiento e inteligencia que me curaron miles de veces, por tu bondad, por todos tus logros, por tu amor de hija, hermana, sobrina, prima y sobre todo por tu “amor materno”, por tu calidad humana e integridad, y muy especialmente por ese espectacular sentido del humor que me hizo llorar de la risa, así como hoy y siempre lloraré tu partida...

Te quiero mucho,
Tu frijolitos escrais

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a la Ilustre Universidad Central de Venezuela por ser mi casa de estudio, no sólo en mi carrera de Ingeniería Química sino también a lo largo de toda mi vida. He tenido el placer de estar en este recinto desde que nací, muchas gracias por todo lo que me has dado y por todo lo que me darás.

Al Prof. Freddy Méndez, por haberme dado la oportunidad de desarrollar este maravilloso Trabajo Especial de Grado, de no ser por Usted nunca hubiese conocido el interesante mundo de las emulsiones. Además, quiero agradecerle por su apoyo y dedicación, pero sobre todo por haberme enseñado (probablemente sin ni siquiera darse cuenta) a aceptar y analizar opiniones diferentes a las mías.

A la incondicional Carolina Blanco, por ser más que mi tutora industrial, mi incansable compañera de tesis y amiga. Por la increíble dedicación a este trabajo, por todos sus conocimientos, por recordarme que lo importante es saber analizar no memorizar. Por todo su apoyo en los momentos difíciles, tanto académicos como personales, muchas gracias. Por escucharme siempre. De verdad MIL GRACIAS, espero que nuestra relación haya sido tan enriquecedora para usted como lo fue para mí.

A mis tutores putativos, Antonio Cárdenas y Franzo Marruffo, por la gigante cantidad de conocimiento que me brindaron, por todo su apoyo, por su dedicación desinteresada a este Trabajo Especial de Grado, es de verdad increíble todo lo que me han ayudado. Hago extensivo este agradecimiento a toda la gente de la familia Orinoquia, de no ser por todos ellos, este trabajo no sería ni la mitad de lo que es .

Quiero agradecer muy especialmente a mis padres, Carmen Medialdea y Johnny Sepúlveda. De no ser por ustedes nada de esto hubiese sido posible, mi amor por la

ciencia nació de ustedes. Por apoyarme en todo y quererme siempre. ¡Los quiero muchísimo!

A mis amigas, compañeras de carrera y vida: Jessica Da Costa y Nathaly Reina. Si trato de enumerar todas las cosas gratificantes y positivas asociadas a la Ing. Química y a mi tesis que me han brindado ustedes creo que no terminaría de escribir jamás, y si además le agregamos las del ámbito personal imagínense. Saben muy bien lo agradecida que estoy con ustedes y lo mucho que significan para mí.

También quiero agradecer a todos mis compañeros del LSM, por toda su ayuda y apoyo, por darme ánimos cuando los necesitaba. A todo el personal de la EIQUCV, especialmente al Sr. Armando Martínez, Sra. Iraida Rojas y Lic. Leudith Figuera, su contribución en la realización de este trabajo fue mucho más grande de lo que se imaginan. A mi combo, ustedes saben quienes son, gracias a ustedes soy la persona que soy y las tengo presentes en todo lo que hago, gracias por su apoyo incondicional y preocupación.

Finalmente, quiero agradecer a José Ignacio Salinas (Nacho) porque de no ser por ti, nada sería como es. Tu apoyo y preocupación por esta tesis son invaluable, pero sobre todo te quiero agradecer por entender siempre la importancia y demanda de tiempo que requirió este trabajo y toda mi carrera, por comprender las largas separaciones por motivos académicos, por nunca reprocharme estas ausencias y siempre estar orgulloso de mí.

Sepúlveda M., Vanessa

DEFINICIÓN DE VARIABLES DE COMPOSICIÓN, FORMULACIÓN Y MEZCLADO PARA LA FORMACIÓN DE EMULSIONES ALIMENTICIAS O/W DE CONTENIDO REDUCIDO DE ACEITE

Tutor académico: Prof. Freddy Méndez. **Tutor industrial:** Ing. Carolina Blanco.
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.
Año 2006, 183 págs.

Palabras clave: Emulsiones alimenticias, surfactantes, espesantes, estabilidad, mezclado.

Resumen. En la industria alimenticia, existe un gran número de productos constituidos por emulsiones, entre ellos se encuentran las vinagretas o aderezos para ensaladas que, en general, se elaboran a partir de una fase aceite dispersa, un surfactante (generalmente no iónico) y una fase acuosa que contiene disueltas sales e hidrocoloides.

En este trabajo se realizó un estudio integral, a escala de laboratorio, de las condiciones de composición, formulación y mezclado necesarias para la formación de una emulsión alimenticia de aceite vegetal en agua, utilizada en la manufactura de la vinagreta ligera de parchita producida por la empresa Orinoquia. Así mismo, se analizó la relación de estos parámetros con las propiedades y la estabilidad en el tiempo del producto final.

Se estudió la influencia de la concentración y naturaleza del agente surfactante y de la relación volumétrica de fases sobre la distribución de tamaño de gota y el diámetro de gota promedio de la emulsión. En otras experiencias, se analizó el efecto de la concentración y tipo de espesante sobre el comportamiento reológico del producto terminado. Además, se realizó una prueba de estabilidad estática en el tiempo para la vinagreta, en la cual se determinó la variación de la distribución de tamaño de gota y la viscosidad del producto en el tiempo. Finalmente, se evaluó la influencia de algunos parámetros asociados al sistema de mezclado empleado sobre la distribución de tamaño de gota de las emulsiones formadas. Es importante destacar, que las distribuciones de tamaño de gota fueron determinadas utilizando un analizador de tamaño de partícula por difracción de luz láser y los valores de viscosidad se midieron empleando un viscosímetro rotacional.

A partir de la experimentación realizada, se obtuvo que el diámetro de gota promedio de la emulsión disminuye a medida que aumenta la concentración de surfactante comercial. La concentración óptima de surfactante comercial (no iónico) para el caso de la vinagreta ligera de parchita, debe ser un valor que equilibre la distribución de tamaños de gota, la estabilidad de la emulsión en el tiempo y los costos de manufactura. Por otra parte, en la evaluación de la mostaza como agente surfactante, no se observaron variaciones de los valores de diámetro de gota de la emulsión para

concentraciones de mostaza entre 2 y 10 %. Los valores obtenidos para todos los casos están alrededor de 100 micras. En cuanto a la evaluación de las propiedades emulsificantes de la yema de huevo, se obtuvo que el diámetro de gota promedio de la emulsión disminuye a medida que aumenta la concentración de yema de huevo. Pudo observarse que la variación en el diámetro de gota promedio de la emulsión es significativa, para pequeñas variaciones en la concentración de yema de huevo.

Las relaciones aceite/agua evaluadas, permitieron determinar el valor óptimo en relación a la distribución de tamaño de gota obtenida, en este caso, se obtuvo un valor de diámetro de gota promedio de 5,5 micras para la relación 80/20. Por esto, se recomienda utilizar esta relación aceite/agua en la formación de la emulsión, ya que permite obtener un diámetro de gota mínimo y, por lo tanto, una emulsión de mejor estabilidad.

La vinagreta ligera de parchita posee un comportamiento reológico del tipo pseudo-plástico, determinado por la presencia de aditivos espesantes. En este sentido, se obtuvieron valores de viscosidad en la vinagreta ligera, similares a los de la vinagreta tradicional (no ligera) empleando una concentración de 4.500 ppm de aditivo espesante, por lo que se recomienda iniciar operaciones empleando esta concentración.

En lo referente a la estabilidad estática en el tiempo de la vinagreta, se evaluó una producción en la que se utilizó una concentración de surfactante no iónico de 8.000 ppm (base aceite), una relación aceite/agua de 80/20 y 4.500 ppm de aditivo espesante, y se obtuvo que para esta especificación se opera en una condición estable de proceso y los resultados de diámetro de gota y estabilidad durante los 6 meses evaluados indican una excelente estabilidad del producto ya que se mantienen constantes las propiedades de la emulsión.

Para finalizar, se tiene que en la evaluación del sistema de mezclado se observó una tendencia prácticamente lineal del diámetro de gota promedio respecto a la velocidad de agitación a la cual se forma la emulsión. Por otra parte, se obtuvo que el diámetro de gota promedio de la emulsión permanece prácticamente constante para tiempos de agitación mayores a 6 minutos. Siendo un impulsor del tipo estator-rotor el empleado en este caso para toda la evaluación de los parámetros de mezclado, se observó que el diámetro de gota promedio de la emulsión es prácticamente independiente de la configuración geométrica del sistema de mezclado.

ÍNDICE

	Pág.
Capítulo I. Introducción	1
Planteamiento del Problema	2
Objetivos	4
Capítulo II. Fundamentos Teóricos	5
Vinagretas y Aderezos: Emulsiones Alimenticias	5
Ingredientes y Procedimiento de Preparación	6
Aditivos Alimentarios	7
Propiedades Físicas y Químicas	12
Emulsiones	14
Tipos de Emulsiones	16
Composición y Formulación Fisicoquímica	20
Formación de Emulsiones	22
Propiedades de las Emulsiones y su Medición	29
Surfactantes	43
Tipos de Surfactantes	44
Surfactantes en Solución Acuosa	48
Espesantes	54
Espesantes Utilizados en la Producción de Aderezos para Ensaladas	56
Sinergia entre Espesantes	58
Análisis Dimensional y Similitud	59
Mezclado	62
Modelos de Flujo en Tanques Agitados	64
Mezcla de Líquidos Inmiscibles	66
Capítulo III. Metodología	70
Procedimiento de Elaboración de la Vinagreta Ligera de Parchita de la Empresa Orinoquia	70

Metodología General	71
Plan de Experiencias	74
Inducción a la Planta	74
Pruebas Tipo I: Barrido de Concentración de Agentes Surfactantes	75
Pruebas Tipo II: Barrido de Relación Volumétrica de Fases	77
Pruebas Tipo III: Efecto de la Concentración y Tipo de Espesante	78
Pruebas Tipo IV: Estabilidad en el Tiempo	81
Pruebas Tipo V: Mezclado	82
Pruebas Adicionales	84
Capítulo IV. Análisis de Resultados	85
Inducción a la Planta	85
Pruebas Tipo I: Barrido de Concentración de Agentes Surfactantes	94
Pruebas Tipo II: Barrido de Relación Volumétrica de Fases	103
Pruebas Tipo III: Efecto de la Concentración y Tipo de Espesante	107
Pruebas Tipo IV: Estabilidad en el Tiempo	114
Pruebas Tipo V: Mezclado	121
Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones	132
Referencias	135
Anexos	140

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		Pág.
1	Tipos de emulsiones según la naturaleza de su fase interna.	17
2	Deformación y ruptura de una gota en un campo de cizallamiento Couette, en función de la viscosidad (μ) de las fases (i: interna, e: externa), y de la intensidad del cizallamiento.	27
3	Deformación “varicosa” y ruptura de un hilo líquido. El tiempo crece de arriba a abajo.	29
4	Percolación en emulsiones W/O.	31
5	Histogramas diferencial y acumulativo de una distribución de tamaño de partículas.	33
6	Analizador de tamaño por difracción de luz láser.	35
7	Definición del concepto de viscosidad.	39
8	Viscosímetro rotacional de Brookfield.	43
9	Micela.	50
10	Solubilización micelar.	50

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA		Pág.
1	Muestras tomadas en la etapa de inducción a la planta.	74
2	Cantidades de aceite, agua y surfactante comercial para el barrido de concentración de surfactante.	75
3	Cantidades de aceite, agua y mostaza para el barrido de concentración de mostaza.	75
4	Cantidades de aceite, agua y yema de huevo para el barrido de concentración de yema de huevo.	76
5	Cantidades de aceite, agua y surfactante comercial para el barrido de relación volumétrica de fases.	77
6	Cantidades de aceite, agua (o pulpa) y surfactante comercial para la preparación de la emulsión concentrada.	78
7	Concentración de espesantes empleada en la etapa de dilución durante la preparación de los sistemas en limpio.	79
8	Espesantes y concentración empleadas en la etapa de dilución durante la evaluación de los efectos sinérgicos.	80
9	Valores de D [4, 3] y span asociados a las distribuciones de tamaño de gota del barrido de concentración de surfactante comercial.	96
10	Valores de D [4, 3] y span asociados a las distribuciones de tamaño de gota del barrido de concentración de mostaza.	98
11	Valores de D [4, 3] y span asociados a las distribuciones de tamaño de gota del barrido de concentración de yema de huevo.	101
12	Valores de D [4, 3] y span asociados a las distribuciones de tamaño de gota del barrido de relación volumétrica de fases.	103
13	Valores de D [4, 3] y span asociados a las distribuciones de tamaño de gota de la producción N° 1 en el tiempo.	115
14	Valores de D [4, 3] y span asociados a las distribuciones de tamaño de gota de la producción N° 2 en el tiempo.	118
15	Dimensiones de los recipientes utilizados en el estudio del efecto de la configuración geométrica del sistema de mezclado.	127
16	Relaciones geométricas evaluadas en el estudio del efecto de la configuración del sistema de mezclado, asociadas a las cuatro emulsiones preparadas.	127

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO	Pág.
1 Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión concentrada respecto al tiempo de agitación (producción N° 1).	86
2 Variación de la distribución de tamaño de gota en la etapa de dilución respecto al tiempo de agitación (producción N° 1).	87
3 Distribuciones de tamaño de gota para las dos etapas del proceso en comparación con la distribución de tamaño de partícula de la pulpa de parchita (producción N° 1).	88
4 Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión concentrada respecto al tiempo de agitación (producción N° 2).	89
5 Variación de la distribución de tamaño de gota en la etapa de dilución respecto al tiempo de agitación (producción N° 2).	91
6 Distribuciones de tamaño de gota para las dos etapas del proceso en comparación con la distribución de tamaño de partícula de la pulpa de parchita (producción N° 2).	92
7 Variación del diámetro de gota promedio en volumen respecto al tiempo de agitación (producción N° 2).	93
8 Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión respecto a la concentración de surfactante comercial utilizada.	94
9 Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión respecto a la concentración de mostaza utilizada.	97
10 Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión respecto a la concentración de yema de huevo utilizada.	100
11 Variación del diámetro de gota promedio en volumen respecto a la concentración y tipo de agente surfactante utilizado.	102
12 Variación del diámetro de gota promedio en volumen respecto a la relación volumétrica de fases.	105
13 Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión respecto a la relación volumétrica de fases.	106
14 Comportamiento reológico de las muestras preparadas en limpio y de la vinagreta de parchita tradicional.	108
15 Comportamiento reológico de las muestras que contienen 2.700 ppm del espesante N° 1, en limpio y con todos los ingredientes de la formulación; así como el de la vinagreta tradicional.	110
16 Comportamiento reológico de las muestras que contienen 2.700 ppm y 4.500 ppm del espesante N° 1, así como el de la vinagreta tradicional.	111
17 Comportamiento reológico de las muestras que contienen 2.700 ppm del espesante N° 1, en sinergia con los espesantes N° 2 y N° 3, así como el de la vinagreta tradicional.	112

18	Variación de la distribución de tamaño de gota de la producción N° 1 en el tiempo.	114
19	Variación del diámetro de gota promedio en volumen de la producción N° 1 en el tiempo.	116
20	Variación de la distribución de tamaño de gota de la producción N° 2 en el tiempo.	117
21	Variación del diámetro de gota promedio en volumen de la producción N° 2 en el tiempo.	119
22	Comportamiento reológico de la vinagreta de parchita ligera (producción N° 2).	120
23	Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión respecto a la velocidad de agitación.	122
24	Variación del diámetro de gota promedio en volumen de la emulsión respecto a la velocidad de agitación.	123
25	Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión respecto al tiempo de agitación.	125
26	Variación del diámetro de gota promedio en volumen de la emulsión respecto al tiempo de agitación.	126
27	Variación de la distribución de tamaño de gota de las emulsiones, respecto a la configuración geométrica del sistema de mezclado.	128
28	Variación del diámetro de gota promedio en volumen de las emulsiones, respecto a la configuración geométrica del sistema de mezclado.	129
29	Comportamiento reológico de una solución de 3.500 ppm de goma Xantan.	147

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

A	Área
CMC	Concentración micelar crítica
D [4, 3]	Diámetro de gota promedio en volumen
D _i	Diámetro del impulsor
D _R	Diámetro del recipiente
EIUCV	Escuela de Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela
Eu	Número de Euler
F	Fuerza
Fr	Número de Fraude
g	Aceleración de gravedad
HLB	Balance hidrofílico-lipofílico
h _L	Altura de líquido
L	Longitud característica
N _P	Número de potencia
O	Aceite (<i>oil</i>)
P	Potencia
Re	Número de Reynolds
TEG	Trabajo especial de grado
V	Velocidad
V _A	Velocidad de agitación
v _x	Componente en la dirección x de la velocidad
W	Agua (<i>water</i>)
WOR	Relación agua/aceite (<i>water/oil ratio</i>)
We	Número de Weber
x	Dirección del eje de las abscisas
y	Distancia entre dos láminas (definición de viscosidad)

Δp	Caída de presión
ρ	Densidad
μ	Viscosidad dinámica
μ_e	Viscosidad dinámica de la fase externa
μ_i	Viscosidad dinámica de la fase interna
η	Coefficiente de viscosidad
σ	Tensión superficial
τ	Esfuerzo

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La química es hoy en día una de las ciencias más aplicadas en la industria de los alimentos, más aún cuando se trabaja en el desarrollo de un nuevo producto, lo que implica en una primera etapa, la realización de un estudio integral a escala de laboratorio de las condiciones de composición, formulación y formación necesarias para obtener un producto con las propiedades deseadas. La segunda etapa consiste en el escalamiento a nivel comercial de las mejores condiciones operacionales, obtenidas como resultado del estudio previo realizado en el laboratorio.

Orinoquia Alimentos es una empresa nacional que manufactura y comercializa productos alimenticios, como salsas y aderezos. Entre sus principales productos se encuentran las vinagretas, o aderezos para ensaladas, las cuales se caracterizan por ser emulsiones de aceite vegetal en agua, estabilizadas con surfactantes y agentes poliméricos, para asegurar su estabilidad en el tiempo estimado de almacenamiento en el anaquel y el consumidor (tiempo de vida).

Entre los nuevos productos que Orinoquia Alimentos planea desarrollar y colocar en el mercado nacional, se encuentran vinagretas de contenido reducido de aceite y carbohidratos, en otras palabras, aderezos para ensaladas de calorías reducidas que formen parte de la categoría de alimentos ligeros (*light*).

Con la realización de este trabajo se pretende profundizar en el conocimiento acerca de las condiciones óptimas de formulación y operación para la manufactura de una emulsión de aceite en agua con bajo contenido de aceite. Además, a partir de este estudio pueden iniciarse vínculos importantes entre la Universidad Central de Venezuela y la industria, que promuevan el desarrollo mutuo a través del intercambio de conocimiento; a la par que los estudios de laboratorio realizables en la Universidad, podrían convertirse en una fuente de ingresos para la misma.

Planteamiento del Problema

Durante los últimos años, se ha comenzado a tomar conciencia de la relación entre la salud y la alimentación, sobre todo en lo relativo a la obesidad, de ahí surge el auge de los productos ligeros (*light*), que día a día tienen una mayor demanda, no sólo en el mercado nacional sino también a nivel mundial. Actualmente, Orinoquia Alimentos se encuentra trabajando en el desarrollo de un nuevo producto: vinagreta de parchita ligera, la cual es una emulsión de aceite vegetal en agua. Este aderezo de calorías reducidas espera capturar al cliente que quiere cuidar su alimentación, pero disfrutando de un delicioso sabor.

Las emulsiones son un caso particular de sistemas líquido-líquido, comunes en la industria de alimentos. Dado que la formación de una emulsión no es un proceso espontáneo, se requiere de la coincidencia en el sistema de ciertas variables de composición y formulación, tales como: la relación volumétrica de fases, el tipo y cantidad de surfactante, la salinidad del medio, entre otros; todo esto con una cantidad suficiente de energía externa de agitación para lograr cizallar, romper y así dispersar un líquido en el otro.

A pesar de la experiencia y conocimiento que Orinoquia Alimentos posee en lo relacionado a emulsiones de aceite vegetal en agua, resulta imprescindible realizar un estudio detallado de las condiciones de formulación, composición y mezclado, para el desarrollo de la vinagreta ligera como un nuevo producto. El bajo porcentaje de aceite que caracteriza a esta emulsión es una innovación para la empresa, por lo que surgen interrogantes acerca de cuáles serán las cantidades óptimas de surfactante y espesantes, así como las condiciones de formación y mezclado más adecuadas, que permitan obtener un producto con las características más favorables de estabilidad, sabor y consistencia.

Además de caracterizar los ingredientes y el proceso de elaboración más adecuado para la vinagreta de parchita ligera, este estudio pretende profundizar en el conocimiento de las emulsiones y su formación, más allá de su aplicación en la elaboración de este producto en específico. La teoría de emulsiones es aplicable, no sólo en otras áreas de la industria de alimentos, sino también en otros procesos relacionados con el petróleo, los cosméticos, la industria farmacéutica, el sector agrícola, entre otros.



Objetivos

A continuación se presentan el objetivo general y los objetivos específicos de este Trabajo Especial de Grado.

Objetivo general:

Realizar un estudio integral, a escala de laboratorio, de las condiciones de composición, formulación y mezclado necesarias para la formación de emulsiones alimenticias de aceite vegetal en agua, y de la relación de estos parámetros con las propiedades reológicas y estabilidad en el tiempo del producto final.

Objetivos específicos:

1. Seleccionar e implementar técnicas experimentales de laboratorio, tales como: medición de distribución de tamaño de gota y medición de viscosidad, para la evaluación de propiedades físicas de sistemas emulsionados de aceite en agua.
2. Realizar barridos de relación volumétrica de fases y concentración de surfactante, para definir el mapa fisicoquímico del sistema disperso.
3. Evaluar el efecto de la concentración y tipo de polímero (espesante) en la viscosidad y estabilidad de la emulsión final.
4. Evaluar diferentes sistemas de mezclado, convencionales (comerciales) y no convencionales, disponibles para el proceso de emulsificación.
5. Realizar una prueba de estabilidad en el tiempo para las emulsiones preparadas.
6. Realizar el escalamiento teórico de las condiciones óptimas de laboratorio y formar parte del ajuste fino a nivel industrial, del proceso de manufactura de las emulsiones de aceite en agua, con bajo contenido de aceite.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En esta sección se presentan los fundamentos teóricos, correspondientes a estudios previos, que servirán de base para la realización de este trabajo.

Vinagretas y Aderezos: Emulsiones Alimenticias

Desde hace mucho tiempo, las emulsiones han sido objeto de estudio debido a su frecuente presencia en la vida diaria. Algunas emulsiones que nos son familiares incluyen: emulsiones alimenticias como la leche y la mayonesa, cosméticas como las cremas y lociones, farmacéuticas como vitaminas solubles y hormonas, y agrícolas como las formulaciones emulsionadas de insecticidas y herbicidas .⁽¹⁾

En el caso específico de la industria alimenticia, existe un gran número de productos constituidos por emulsiones, entre los cuales se pueden citar: margarina, mayonesa, aderezos para ensaladas, leche, helados, emulsiones cárnicas, etc. Debido a la importancia de estos productos, las emulsiones alimenticias representan un área de gran relevancia dentro de la industria de alimentos y requieren un estudio especial.⁽²⁾

Las emulsiones se definen como mezclas compuestas de al menos dos líquidos inmiscibles, que en la industria de alimentos son generalmente el agua y el aceite. Uno de estos ingredientes constituye la fase externa o continua, mientras que el otro se encontrará disperso en ella formando lo que se denomina la fase interna. Las emulsiones alimenticias, en la mayoría de los casos, poseen también otros ingredientes, tanto sólidos como líquidos, que son añadidos para mejorar el sabor y la estabilidad del producto. De esta forma, los constituyentes de una emulsión alimenticia interactúan entre sí, ya sea física o químicamente, determinando las propiedades fisicoquímicas y organolépticas del producto final .⁽³⁾

Los aderezos para ensalada son sistemas químicos complejos, ya que se elaboran a partir de una fase oleosa dispersa, un surfactante (generalmente no iónico) y una elevada concentración de ácidos orgánicos incluidos en una fase acuosa que contiene habitualmente sales, glúcidos simples e hidrocoloides. ⁽⁴⁾

Desde la más simple a la más sofisticada, las vinagretas o aderezos para ensaladas representan un elemento importante en la cocina y pueden ser utilizadas para darle sabor a diferentes comidas, como lo son: ensaladas, verduras, pescados, legumbres y pastas, por poner sólo los ejemplos más significativos de sus muchas posibilidades.

Ingredientes y Procedimiento de Preparación

Los dos ingredientes básicos de cualquier vinagreta son el aceite y el vinagre. Ambos ofrecen una enorme diversidad de clases, por lo que es importante adecuar el tipo de aceite y de vinagre a los alimentos sobre los que se va a disponer la vinagreta. Más allá del aceite y el vinagre, es posible añadir un sinnúmero de productos para preparar variantes originales y algo más trabajadas de la clásica vinagreta. Es el caso de los encurtidos, como pepinillos o alcaparras, del huevo duro o del ajo. Igualmente se pueden emplear mostaza, frutos secos, un buen número de hierbas aromáticas, jugo de frutas y hasta miel.

En la forma tradicional (casera) de preparar una vinagreta se sigue una proporción de una parte de vinagre y otras tres de aceite, aunque la regla admite variaciones en función de los gustos. Para prepararla, se coloca en un recipiente el vinagre, se sazona con sal y pimienta, y finalmente se añade el aceite; luego de esto se debe agitar enérgicamente. En caso de que lleve otros ingredientes, éstos deben incorporarse siempre antes que el aceite para lograr que la salsa emulsione correctamente. ⁽⁵⁾

Sin embargo, en la industria de alimentos, nuevos productos que sean una versión práctica de los productos tradicionales, representan un prometedor nicho de mercado en la actualidad. Así ocurre con el negocio de los aderezos para ensaladas, cuya

manufactura a nivel industrial ha estado en continuo crecimiento en los últimos tiempos. A pesar de este crecimiento, se necesita un estudio detallado para lograr desarrollar la formulación más adecuada del aderezo, que comienza con la definición de los diferentes tipos de aderezos para ensalada que se pueden preparar, y sus respectivos ingredientes.

Generalmente, la manufactura se realiza a través de la mezcla e incorporación de los ingredientes en una licuadora o mezclador industrial de alta velocidad para lograr homogeneizar la mezcla. Una consideración importante para el proceso de mezclado, es el rango de temperaturas en el cual será realizado; en el caso de los aderezos para ensaladas, estos serán mezclados, almacenados y consumidos a temperaturas relativamente bajas (temperatura ambiente o poco menores). Una vez que el producto está listo, se procede al llenado en frío (a través de tanques de retención) de las botellas previamente preparadas.

A simple vista, el proceso de manufactura a nivel industrial de los aderezos para ensaladas puede parecer sencillo, pero requiere un profundo análisis de todas las variables de composición, formulación y mezclado. Esto se debe a que las emulsiones son sistemas muy complejos, cuyas propiedades reológicas y de estabilidad deben ser evaluadas minuciosamente con la finalidad de mantener la calidad del producto.

Aditivos Alimentarios

Aunque se asocian a los tiempos modernos, los aditivos alimentarios llevan siglos utilizándose. Se emplean desde que el hombre aprendió a conservar los alimentos de la cosecha para el año siguiente, y a conservar la carne y el pescado con técnicas de salazón y ahumado. En general, los propósitos de la cocina casera tradicional y de la industria alimenticia, que emplean métodos de elaboración para preparar y conservar los alimentos, son los mismos.

Gracias al desarrollo de la ciencia y la tecnología de la alimentación en los últimos 50 años, se han descubierto varias sustancias nuevas que pueden cumplir funciones beneficiosas en los alimentos, denominadas aditivos alimentarios. Entre ellos, destacan los surfactantes, los edulcorantes de los productos bajos en calorías, y una gran variedad de conservantes y antioxidantes que demoran la degradación de los productos, todos ellos manteniendo su sabor. ⁽⁶⁾

Se define como aditivo alimentario cualquier sustancia que se añade intencionadamente a los alimentos y bebidas, sin el propósito de cambiar su valor nutritivo, y con el fin de modificar sus características, técnicas de elaboración o conservación, o bien para mejorar su adaptación al uso al que va destinado. Los aditivos pueden o no tener valor nutritivo, pero nunca se añaden pensando en él, ni se usan como un ingrediente del alimento, sino que se añaden a un producto alimenticio pensando en: mejorar su conservación, mantener su valor nutritivo, asegurar la textura o la consistencia de los alimentos para garantizar su estabilidad, o mejorar sus cualidades organolépticas.

Los aditivos alimentarios desempeñan un papel muy importante en el complejo abastecimiento alimenticio de hoy en día. Los consumidores exigen que haya alimentos más variados y fáciles de preparar, y que sean más seguros, nutritivos y económicos. Sólo se pueden satisfacer estas expectativas y exigencias utilizando nuevas tecnologías de transformación de alimentos, entre ellas los aditivos, cuya seguridad y utilidad están avaladas por su uso continuado y por rigurosas pruebas. Los criterios que se tienen en cuenta para el uso de estos aditivos son que tengan una eficacia demostrada, y que sean seguros para el consumidor, por lo que su utilización está estrictamente regulada; en el caso de nuestro país el ente encargado de ello es FONDONORMA, mediante la implementación de la Norma Covenin N° 910, llamada Norma General para Aditivos Alimentarios. En algunos casos, los aditivos alimentarios utilizados son sustancias naturales o nutrientes esenciales, pero se les clasifica como aditivos por el propósito o fin tecnológico que desempeñan. ⁽⁶⁾

Las vinagretas o aderezos para ensaladas no son la excepción, ya que contienen aditivos tanto naturales como artificiales, que son añadidos con diferentes propósitos. Entre los aditivos alimentarios más utilizados en la manufactura de los aderezos para ensaladas se encuentran:

Surfactantes

También conocidos como emulsificantes o emulgentes, son aditivos utilizados en alimentos que son emulsiones de dos fases, una acuosa y otra oleica. Las emulsiones son en principio termodinámicamente inestables, y con el tiempo las gotas de la fase dispersa tienden a reagruparse, separándose de la otra fase; para que este fenómeno de separación no tenga lugar y la emulsión se mantenga estable durante un período largo de tiempo, se utilizan estos aditivos. ⁽⁷⁾

Las propiedades de cada agente surfactante son diferentes, y en general las mezclas se comportan mejor que los componentes individuales. La acción de los emulsificantes es consecuencia de la presencia en su estructura de unos grupos moleculares que atraen el agua y otros distintos que atraen el aceite. Puesto que distintos surfactantes tienen estructuras moleculares diferentes son adecuados solamente para aplicaciones específicas. ⁽⁸⁾ En la sección Surfactantes de este capítulo (p. 44) se describen en detalle los tipos de surfactantes.

Espesantes

Estas sustancias ayudan a incrementar la viscosidad de los alimentos y son muy utilizadas en la producción de aderezos para ensaladas. Su uso, además de estar basado en su comportamiento reológico, también está relacionado en muchos casos con su efecto estabilizante. ⁽⁶⁾

Entre las sustancias capaces de formar geles y lograr aumentar la viscosidad de un producto están: la gelatina, el almidón y sus derivados. Se utilizan también otras sustancias, bastante complejas, obtenidas de vegetales o de microorganismos no

digeribles por el organismo humano. Por esta última razón, al no aportar calorías, se utilizan ampliamente en los alimentos ligeros. Algunos de estos productos no están bien definidos químicamente, pero todos están compuestos de cadenas muy largas formadas por la unión de muchas moléculas de azúcares más o menos modificados. ⁽⁷⁾ En la sección Espesantes de este capítulo (p. 54) se describen en detalle los aditivos espesantes.

Conservantes

Estos aditivos limitan, retardan o previenen la proliferación de microorganismos como: bacterias, levaduras y hongos; los cuales están presentes en los alimentos o acceden a ellos. Por lo tanto, los conservantes evitan que los alimentos se deterioren o se vuelvan susceptibles de causar toxiinfecciones. Las condiciones de uso de los conservantes están reglamentadas estrictamente en todos los países del mundo. Usualmente existen límites para la cantidad que se puede añadir de un conservante y para la de conservantes totales. Estos aditivos, a las concentraciones autorizadas, no matan en general a los microorganismos, sino que evitan su proliferación. ⁽⁶⁾

La selección de un conservante depende de las condiciones de proceso de los alimentos, en particular del pH (acidez), de la actividad del agua, ya que el agua es esencial para la proliferación microbiana, y del tipo de microorganismos que pueda contener el alimento. Existe una gran cantidad de conservantes disponibles, entre los cuales se pueden mencionar los sorbatos y benzoatos (de sodio, calcio y potasio). ⁽⁸⁾

Antioxidantes

Son sustancias que evitan la oxidación de los alimentos e impiden el enranciamiento y la decoloración. La oxidación de las grasas es la forma de deterioro de los alimentos más importante después de las alteraciones producidas por microorganismos. La oxidación es una reacción en cadena, una vez iniciada, continúa acelerándose hasta la oxidación total de las sustancias sensibles. Esta reacción provoca la aparición de olores y sabores a rancio, alteración del color y la textura, y disminución del valor

nutritivo por pérdida de algunas vitaminas y ácidos grasos poli-insaturados. Entre los antioxidantes más utilizados están el ácido cítrico y el ácido ascórbico.

Además, los productos formados en la oxidación pueden llegar a ser nocivos para la salud. Formas de evitar la oxidación de alimentos son el envasado al vacío o en recipientes opacos y el empleo de antioxidantes. La mayoría de los productos grasos contienen antioxidantes naturales, pero estos suelen perderse durante el procesamiento de los mismos. Los mecanismos de acción de los antioxidantes son: interrupción de la reacción en cadena de oxidación de las grasas y eliminación del oxígeno atrapado o disuelto en el producto, o el presente en el espacio que queda sin llenar en los envases. ⁽⁷⁾

Edulcorantes

Son aditivos que confieren un sabor dulce a los alimentos y se utilizan en productos bajos en calorías, como los productos para diabéticos. Estas sustancias tienen un valor calórico reducido y son cientos o incluso miles de veces más dulces que el azúcar común. El uso de edulcorantes artificiales ha sido objeto de múltiples polémicas por lo que respecta a su seguridad a largo plazo. El consumidor debe decidir si asume en algunos casos un riesgo, como contrapartida de la reducción de las calorías ingeridas sin renunciar a determinados alimentos o sabores. ⁽⁶⁾

Un edulcorante determinado no puede sin más sustituir satisfactoriamente a otro. Cada uno tiene una termo-estabilidad distinta y un perfil de sabor diferente. Por ejemplo, una mezcla de un edulcorante de percepción inmediata con otro que tenga un gusto más persistente, logrará dar una sensación más plena y equilibrada de dulzor. Las mezclas de edulcorantes, entre sí y con los azúcares naturales, también potencian el sabor, con una reducción de su concentración total y de su aporte de calorías. Entre los edulcorantes más utilizados en la actualidad, se encuentran el acesulfame K y la sucralosa. ⁽⁸⁾

Los edulcorantes no calóricos, artificiales o naturales, son en este momento una de las áreas más dinámicas dentro del campo de los aditivos alimentarios, por la gran expansión que está experimentando actualmente el mercado de los alimentos y bebidas bajas en calorías. Para que un edulcorante sea utilizable por la industria alimenticia, además de ser inocuo, tiene que cumplir otros requisitos: el sabor dulce debe percibirse y desaparecer rápidamente, y tiene que ser lo más parecido posible al del azúcar común, sin regustos. ⁽⁷⁾

Propiedades Físicas y Químicas

En la actualidad, son muchos los tipos de vinagretas y aderezos disponibles en el mercado, los cuales contienen diferentes tipos de aceite y vinagre, jugos o pulpa de frutas, hierbas y más ingredientes o aditivos, de los que dependen las propiedades específicas del producto.

La estabilidad de los aderezos durante su almacenamiento y consumo, es una de las propiedades más importantes en cuanto a calidad, es decir, un aderezo que se mantenga estable por un período largo de tiempo muchas veces es sinónimo de calidad. Típicamente, éstos son almacenados a temperaturas de refrigeración una vez que han sido adquiridos por el consumidor, lo que debe tomarse en cuenta a la hora de analizar su estabilidad.

Siendo alimentos emulsionados en su mayoría, los aderezos para ensaladas presentan problemas de calidad en relación a: la estabilidad de la emulsión, el deterioro del sabor y color debido a la oxidación e hidrólisis de los lípidos y al crecimiento microbiano. Con el objeto de mejorar la formación y estabilidad de estas emulsiones, los surfactantes son ampliamente utilizados; éstos se adsorben a la superficie de las gotas de emulsión durante la homogeneización y forman una membrana protectora que previene los fenómenos de floculación y coalescencia.

Por otra parte, el pH de los aderezos para ensaladas varía en un rango de aproximadamente 2,5 a 4,0 debido a la incorporación de ácido acético en una concentración que oscila entre 0,5% y 1,2%. Aunque estas condiciones son generalmente de carácter bactericida, un limitado grupo de microorganismos acidófilos es capaz de crecer bajo estas condiciones, lo que se evidencia por la generación de dióxido de carbono y el deterioro del sabor. La microflora causante del deterioro de aderezos y salsas parece bastante restringida y consiste en pocas especies de *Lactobacillus*, *Saccharomyces* y *Zygosaccharomyces*.

Los anti-microbianos más empleados para la preservación de estos productos son sorbatos y benzoatos. Para asegurar la estabilidad microbiológica del producto, se debe tener en cuenta que el preservador se posiciona entre las fases acuosa y oleosa y, por ende, no se encuentra en su totalidad disponible para ejercer su acción. Además, puede interaccionar con las micelas del surfactante presente y verse modificada su efectividad. ⁽²⁾

Otra propiedad que generalmente es común entre los aderezos para ensaladas es su relativamente alta viscosidad, la cual es consecuencia de la presencia de espesantes y/o del hecho de ser una emulsión (según sea el caso). Esta propiedad es importante no sólo para que el consumidor sienta una consistencia agradable en la boca cuando lo ingiera, sino también para que el aspecto visual sea el adecuado, influyendo además en cómo su sabor es liberado y en cómo se vierten sobre los alimentos al cual se añaden. ⁽⁹⁾

La mayoría de los aderezos se caracterizan por ser fluidos pseudo-plásticos, es decir, fluidos cuya viscosidad depende de la tasa de corte aplicada en un momento dado. La teoría indica, en el caso de estos fluidos, que la viscosidad disminuye a medida que la tasa de corte aumenta; razón por la cual la viscosidad de los aderezos para ensaladas disminuye al momento de ser ingerido, debido a que al masticarlo la tasa de corte aplicada aumenta. ⁽¹⁰⁾

En cuanto al sabor y el color de la vinagreta o aderezo, se tiene que éstas son características muy variantes entre uno y otro, estando sujetas además al gusto y selección del consumidor. A pesar de esto, es importante que estas propiedades sean constantes en el tiempo, ya que cambios en ellas son interpretados directamente como disminución de la calidad, lo que afecta negativamente a la imagen de la marca. Además, cambios en el sabor y color del aderezo, podrían ser consecuencia de problemas químicos en el producto, tales como: el crecimiento microbiano, la oxidación de los aceites, degradación de ciertas sustancias, entre otros.

Todas las propiedades mencionadas anteriormente están íntimamente relacionadas entre sí, por ejemplo, el pH del aderezo, además de tener una influencia sobre la estabilidad microbiológica del mismo, pudiese afectar la hidratación de un espesante determinado durante el procesamiento. A su vez, el agregar un espesante puede afectar positiva o negativamente la estabilidad de la emulsión, cuyas propiedades reológicas y de estabilidad dependen de: el tipo de aceite y su concentración, el tipo y cantidad de aditivos (emulsificantes, espesantes, conservantes y antioxidantes), orden de adición de los ingredientes, condiciones de envasado y almacenamiento, etc. Como puede observarse, la íntima relación entre todas las variables y su efecto sobre las propiedades y características del producto, deben evaluarse y analizarse cuidadosamente, realizando estudios rutinarios para asegurar su calidad.

Emulsiones

Se llama dispersión a un sistema polifásico en el cual una fase se encuentra en forma fragmentada (fase dispersa o interna) dentro de otra (fase continua o externa). Existen varios tipos de sistemas dispersos y cada uno tiene una denominación particular. Entre las dispersiones cuya fase continua es un líquido, la clasificación se establece en función de cuál sea la fase dispersa: si es un gas se denomina espuma, si es un líquido es una emulsión, y finalmente si es un sólido se llama suspensión.

Cuando se habla de dispersión es imprescindible destacar la importancia del tamaño de los fragmentos de la fase interna. En efecto, el comportamiento de la dispersión depende en buena parte del tamaño de los mismos. Se entiende por fragmento una cierta cantidad de materia gaseosa, líquida o sólida, que si son de tamaño macroscópico, se llaman burbuja, gota o partícula, respectivamente. Si los fragmentos son de tamaño inferior al micrómetro, pero netamente superior al tamaño de una molécula, la dispersión se llama coloide.

Según la definición anterior de coloide, el límite superior de tamaño depende esencialmente de la estabilidad del sistema frente a la sedimentación gravitacional. Si no hay separación por sedimentación se habla de una solución o suspensión coloidal, o una micro-emulsión. Al contrario, los sistemas que se separan por sedimentación (cualquiera sea el tiempo requerido) no son estables y se llamarán espumas, macro-emulsiones o suspensiones, dependiendo de cual sea su fase interna o dispersa. En forma general se utiliza el término emulsión para referirse a las macro-emulsiones. ⁽¹¹⁾

Puede definirse entonces una emulsión como un sistema heterogéneo que contiene dos fases líquidas inmiscibles, una de las cuales está dispersa en la otra formando gotas cuyos diámetros están generalmente en el intervalo de 0,1 a 150 micras. Estos sistemas son termodinámicamente inestables, pero la estabilidad puede ser mejorada desde el punto de vista cinético mediante la presencia de ciertos aditivos que sean capaces de adsorberse en la interfase, como lo son los agentes surfactantes. La noción de estabilidad es por supuesto relativa, pero se refiere a una casi ausencia de cambio durante un período de tiempo suficientemente largo para el propósito de la aplicación práctica, lo cual puede variar de algunos minutos a algunos años. ⁽¹²⁾

Se encuentran emulsiones en la naturaleza como el látex o la leche, pero en general las emulsiones son productos manufacturados con un cierto propósito. Algunas emulsiones permiten aumentar considerablemente el área de contacto entre dos líquidos y por tanto favorecen la transferencia de masa, por ejemplo en procesos de

extracción líquido-líquido, o en polimerización en emulsión. Se encuentran emulsiones en muchas aplicaciones domésticas o industriales como el acondicionamiento de alimentos y bebidas, las pinturas, los productos farmacéuticos y cosméticos, etc. En realidad los fabricantes de emulsiones deben enfrentarse casi siempre a una serie de especificaciones, a veces drásticas, para que el producto final tenga las propiedades requeridas por el uso. ⁽¹³⁾

Tipos de Emulsiones

Las emulsiones pueden ser clasificadas según diversos criterios, por ejemplo según la naturaleza o el porcentaje de la fase dispersa, según el tipo de distribución de tamaño de gota, entre otras. Algunas de estas clasificaciones se presentan a continuación.

Según la naturaleza de la fase dispersa

En la mayoría de los casos en los que existe una emulsión con dos líquidos inmiscibles, uno de los líquidos es una fase acuosa y el otro una fase aceite u orgánica. Se usarán las abreviaturas W (*water*) y O (*oil*) para dichas fases, ya que en castellano las palabras agua y aceite empiezan por la misma letra. Si la emulsión contiene gotas de aceite (O) dispersadas en agua (W), se le llamará O/W, es decir, emulsión de aceite en agua; ésta es la emulsión normal para todas las aplicaciones con excepción de la producción del petróleo. Por el contrario, si la fase dispersada es el agua, se llama una emulsión W/O (de agua en aceite). El tipo de emulsión según la naturaleza de la fase interna puede determinarse de varias formas, la más común de ellas es a través de la medición de su conductividad electrolítica.

Pueden existir casos más complejos. Por ejemplo, si las gotas de aceite de una emulsión O/W contienen en su interior gotas más pequeñas de agua, se dice que se tiene una emulsión múltiple de tipo W/O/W, de la misma forma también pueden existir emulsiones del tipo O/W/O. Las emulsiones múltiples se encuentran en forma espontánea en ciertas circunstancias, o pueden prepararse intencionalmente. Éstas no

pueden definirse con la concentración de ambas fases, hay que especificar el contenido de fases internas en los dos tipos de gotas. ⁽¹¹⁾

A continuación en la figura N° 1 se muestran los diferentes tipos de emulsiones, según la naturaleza de su fase interna.

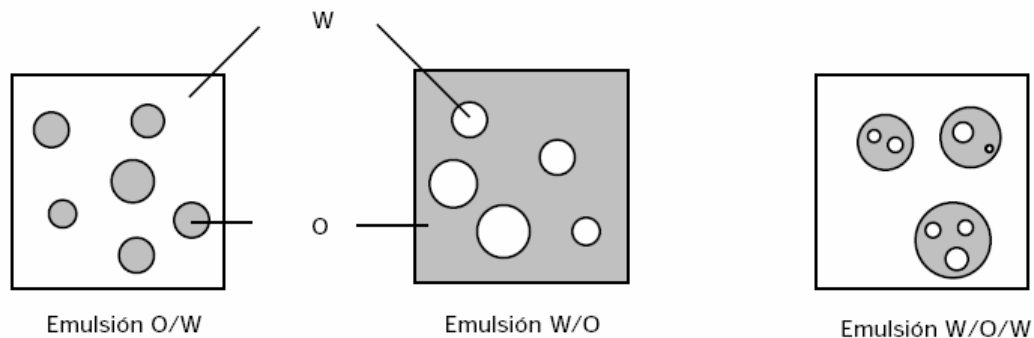


Figura N° 1: Tipos de emulsiones según la naturaleza de su fase interna. ⁽¹¹⁾

Se dice que una emulsión se ha invertido, cuando cambia del tipo O/W a W/O o viceversa. En ciertos casos este fenómeno denominado inversión, puede considerarse como una inestabilidad especial, por ejemplo cuando se produce por exceso de agitación; no obstante, en otros casos debe considerarse como una simple transición asociada a un cambio en la afinidad del surfactante. ⁽¹⁴⁾

Según la distribución de tamaño de gota ⁽¹³⁾

Cada una de las dos fases inmiscibles que conforman una emulsión, ocupan un cierto volumen en el espacio del sistema. Las propiedades de una emulsión determinada dependen, en buena parte, del volumen ocupado por cada fase y de la manera en la cual esté distribuido este volumen. A continuación se presenta la clasificación de las emulsiones, según su dispersión en la distribución de tamaño de gota.

1. Emulsión mono-dispersa: En este caso, la emulsión está conformada por gotas que son del mismo tamaño o muy similar. En el caso ideal, donde se tuviesen

gotas esféricas del mismo tamaño, la ocupación máxima del volumen total por parte de las gotas sería del 74%, asociado a un empacamiento hexagonal compacto. Este empacamiento, es el más denso de todos cuando se habla de gotas del mismo tamaño, por lo que es de suponerse que si el porcentaje de fase interna supera el 74% se deformará la forma esférica de las gotas. Sin embargo, una emulsión mono-dispersa nunca alcanza el apilamiento hexagonal compacto de manera ideal, por lo que generalmente las deformaciones de las gotas se empiezan a producir a partir de un porcentaje de fase interna del orden del 60%.

2. Emulsión poli-dispersa: Generalmente los aspectos mecánicos involucrados en la formación de una emulsión conllevan al establecimiento de un sistema poli-disperso, en el cual las gotas formadas presentan una distribución de diferentes tamaños, ya que en el campo de cizallamiento que sufre la interfase, es muy común que se forme una gota grande, acompañada de pequeñas gotas satélites. Desde el punto de vista práctico, la distribución en volumen es más importante que la distribución en diámetro, ya que da cuenta de la importancia volumétrica de cada fracción. Para el caso del apilamiento hexagonal compacto, las gotas más grandes pueden ocupar hasta el 74% del volumen, mientras que las más pequeñas pudieran ubicarse en el 26% restante. Es entonces teóricamente factible, llegar a más del 95% de fase interna sin requerir deformación de las gotas en una emulsión poli-dispersa; sin embargo, en los casos reales la gravedad ejerce una fuerza de compactación, que propicia la deformación de las gotas cuando entran en contacto.

Según el porcentaje de fase interna ⁽¹³⁾

Con todo lo mencionado anteriormente, se demuestra que el porcentaje de fase interna no es suficiente para determinar la geometría de una emulsión. Por lo tanto, a continuación se presenta únicamente una clasificación general de las emulsiones, sin que esto fije de forma definitiva, las fronteras entre las clasificaciones anteriores.

1. Entre 0 y 5% de fase interna: Son emulsiones de muy bajo contenido de fase interna, en las cuales las gotas no presentan interacciones directas entre si. Es un caso de poco interés práctico, salvo en el estudio de la contaminación de agua por hidrocarburos, y otras aplicaciones muy específicas .
2. Entre 5% y 30% de fase interna: Se trata de emulsiones de bajo contenido de fase interna, cuyas propiedades presentan desviaciones no considerables (despreciables) a las teorías actualmente disponibles. Tienen un cierto interés práctico, más significativo que el anterior, que generalmente está asociado a situaciones de impurezas indeseables en un compuesto determinado.
3. Entre 30% y 70% de fase interna: Son emulsiones de mediano contenido de fase interna, cuyas propiedades presentan desviaciones notables al comportamiento newtoniano, y dependen considerablemente de su formulación y método de preparación. Generalmente, este rango de concentración de fases es en el cual se pueden obtener los dos tipos de emulsiones O/W y W/O , dependiendo de cuales sean las condiciones experimentales. Este tipo de emulsiones es muy importante desde el punto de vista de sus aplicaciones, que abarcan desde la mayonesa hasta las cremas farmacéuticas.
4. Por encima de 70% de fase interna: Se trata de emulsiones con alto contenido de fase interna, que en general, no son estables si no contienen el surfactante adecuado. En este tipo de emulsiones el contacto entre gotas es muy frecuente, y la coalescencia puede ocurrir fácilmente. Cuando el contenido de fase interna se acerca al 95%, suele observarse una alta deformación de las gotas y una estructura muy parecida a la de las espumas. Este tipo de emulsiones tiene algunas aplicaciones importantes en tecnología de alimentos, productos farmacéuticos y preparaciones asfálticas.

Composición y Formulación Fisicoquímica

La composición de una emulsión se refiere a las cantidades que ésta contiene de cada sustancia o compuesto, es decir, las cantidades de fase interna y fase externa, así como también la del agente surfactante. Comúnmente esta suele expresarse a través de la proporción relativa de los volúmenes de las fases dispersa y continua; esto es lo que se conoce como WOR, siglas para la expresión en inglés *Water-Oil Ratio*.⁽¹⁶⁾

Adicionalmente debe especificarse la concentración del agente emulsificante, la cual es variable dependiendo de cual sea su aplicación. Debajo de una concentración mínima (0,1% por ejemplo), no hay suficiente surfactante para estabilizar la emulsión, por el contrario, más allá de algunos por cientos (5% por ejemplo), no se obtienen beneficios aumentando su concentración. En la mayoría de las aplicaciones prácticas, esta concentración se encuentra en el rango de 0,2% a 3%. Por razones de eficiencia y de costo se usa en general un emulsionante compuesto de una mezcla de varios agentes surfactantes.⁽¹¹⁾

Por otra parte, la formulación fisicoquímica tiene que ver con la naturaleza de los componentes, los cuales en el sistema más simple, son tres: el surfactante, el agua y el aceite, cada uno con un potencial químico estándar que define su estado fisicoquímico a cierta temperatura y presión. En este caso, las variables de formulación serían cinco, situación que no es común porque pocas veces se utilizan sustancias puras.

El surfactante es en general una mezcla de sustancias con grupos hidrofílicos y lipofílicos variables, empleados en conjunto por razones de costo o para ajustar mejor las propiedades; bien sea por acumulación de efectos, para promediar una propiedad como la hidrofiliidad, o para producir una sinergia. La fase agua contiene por lo general electrólitos, en tipo y cantidad variable. En cuanto a la fase aceite, ésta puede ser un hidrocarburo puro, o contener desde algunos homólogos como los triglicéridos naturales, hasta miles de sustancias como en el caso de un petróleo crudo. Además de

los tres componentes básicos de una emulsión, muchos productos comerciales contienen otras sustancias funcionales llamadas aditivos, que se incorporan para producir un efecto adicional.

El equilibrio fisicoquímico depende de un gran número de variables susceptibles de alterar el balance hidrofílico-lipofílico del sistema, en particular las variables intensivas llamadas de formulación. Las principales variables de formulación han sido reconocidas como aquellas que caracterizan los tres componentes principales y sus interacciones en la interfase: la longitud de cadena alquilo del surfactante, así como su grupo hidrofílico, la salinidad de la fase agua (tipo de electrolito y su concentración), el tipo de aceite (su estructura, volumen molar y polaridad), la presencia de alcoholes (tipo y concentración), la temperatura y la presión. ⁽¹³⁾

Balance hidrofílico-lipofílico (HLB) ⁽¹³⁾

En vista del gran número de variables de formulación que tienen efecto en la formación, el comportamiento y características de una emulsión, a veces es necesario tomar en cuenta solamente una o dos variables que sean las de mayor importancia, lo que dependerá de la aplicación específica. Generalmente, es obvio que el tipo de surfactante sea el parámetro susceptible de tener el mayor efecto cualitativo.

En 1949, Griffin propuso el balance hidrofílico-lipofílico (HLB) como una medida de la afinidad relativa del surfactante para las fases agua y aceite. En la actualidad, el HLB mide en una escala del 0 al 20 la importancia relativa del grupo hidrofílico y del grupo lipofílico en la molécula de surfactante. A continuación, en la ecuación N° 1, se presenta la relación para el HLB de surfactantes no iónicos:

$$HLB = \frac{100}{5} \cdot \frac{\text{Peso molecular de la cadena polióxido de etileno}}{\text{Peso molecular total}} \quad (1)$$

Como puede observarse, el HLB no da cuenta de la salinidad del agua, del tipo de aceite, de la temperatura, ni de otras variables de formulación. Las imprecisiones sobre HLB pueden ser considerables, a veces del orden de 2 unidades. A pesar de esto el HLB ha sido y es una escala muy usada en la práctica, probablemente por su extrema simplicidad, y también porque suministra un excelente método de comparación entre sistemas semejantes, por ejemplo con surfactantes de la misma familia.

Formación de Emulsiones

La tecnología de emulsiones abarca una amplia variedad de industrias y aplicaciones comerciales, cuyos requerimientos son extremadamente diversos. Frente al gran número de factores influyentes, dicha tecnología se ha desarrollado de manera esencialmente empírica. Es cierto que en la actualidad, la emulsificación (formación de emulsiones) no es una ciencia exacta; sin embargo, aparecen tendencias lógicas, y los estudios recientes permiten aclarar ciertos conceptos generales. ⁽¹¹⁾

En la formación de emulsiones, la dispersión de uno de los líquidos en el seno del otro, se produce con un enorme incremento del área interfacial entre ellos, lo que origina un sistema termodinámicamente inestable. La misión del agente emulsionante es estabilizar, por un tiempo adecuado, este sistema básicamente inestable. Esto lo hace, por adsorción en la interfase líquido-líquido, disminuyendo la tensión interfacial, y por lo tanto, la energía libre entre los líquidos inmiscibles. El agente emulsionante también retarda la coalescencia de las gotas dispersas, por creación alrededor de las mismas, de barreras mecánicas, estéricas y/o eléctricas. ⁽¹⁴⁾

A continuación, se clasifican los factores susceptibles de influenciar los resultados de las operaciones de emulsificación en tres grupos:

1. Variables de Formulación: Naturaleza del agente emulsionante y de las fases acuosa y oleica, así como la temperatura. Se refiere a características

fisicoquímicas (intensivas) del sistema, y corresponde al concepto de HLB y otros semejantes. ⁽¹¹⁾

2. Variables de composición: Proporción relativa de agua y aceite (WOR), y concentración del emulsionante. Corresponde a las variables de composición (extensivas), en particular a los efectos de inversión física forzada, es decir, el caso de inversión de una emulsión debido al exceso volumétrico de una de las fases. ⁽¹¹⁾
3. Factores fluodinámicos: Aparato utilizado, intensidad de agitación, y procedimiento de elaboración. Se refiere al procedimiento técnico, al tipo e intensidad de agitación, y a los aparatos utilizados para formar las emulsiones. Es en esta parte que el empirismo domina la situación, ya que a pesar de los numerosos estudios fundamentales orientados hacia su modelación, no existe todavía un modelo general que pueda utilizarse para hacer predicciones de comportamiento. ⁽¹⁵⁾

Las interacciones y los fenómenos relacionados con la emulsificación, son bastante complejos, de ahí el desarrollo mayormente empírico de los avances relacionados al tema. Por esto, durante los últimos años, las mejoras en este aspecto han consistido esencialmente en perfeccionamientos tecnológicos de los aparatos, o en la obtención de emulsificantes más variados. ⁽¹⁵⁾

Tipos de emulsificación ⁽¹¹⁾

Existen tres clases de operación de emulsificación, cada una de las cuales está basada en un principio diferente. La primera clase abarca las operaciones que consisten en producir una inestabilidad de carácter fluodinámico para formar la emulsión, esto involucra en general dos etapas: cizallamiento intenso que produce una conformación interfacial de gran área (ondas, gotas alargadas, chorros) y, como segunda etapa, inestabilidad hidrodinámica de dicha conformación, bajo el efecto de las fuerzas

inerciales o capilares. A esta primera clase pertenecen la mayoría de los aparatos llamados dispersores, entre los cuales se encuentran: agitadores de hélice o turbina, homogeneizadores, orificios, molinos coloidales, dispersores ultrasónicos, dispersores de chorro o pulverizadores.

La segunda clase corresponde a un proceso que consiste en colocar gotas de la fase interna en el seno de la fase externa, mediante un proceso esencialmente físico, como es la condensación de vapor. Básicamente, el vapor de uno de los líquidos (fase interna), se inyecta en el seno del otro (fase externa), y en vista de que este último está a una menor temperatura, el vapor se enfría y condensa en finas gotas, que suelen estar dispersadas a su vez por agitación mecánica.

La tercera clase junta los diferentes mecanismos posibles de emulsificación espontánea, en los cuales la transferencia de masa, es decir un proceso transitorio, es responsable de la inestabilidad de tipo fisicoquímico, sin ningún tipo de aporte mecánico externo.

Obtención de diferentes tipos de emulsión ⁽¹⁵⁾

Las emulsiones de bajo contenido de fase interna generalmente son fáciles de producir; sus técnicas de fabricación consisten en fraccionar mecánicamente la fase interna produciendo una dispersión macro-globular, que posteriormente se subdivide en gotas finas mediante la aplicación de un campo de cizallamiento intenso, empleando aparatos como agitadores de turbina, orificio o molinos coloidales. También pueden producirse directamente las gotas finas, empleando la condensación de vapor de la fase interna dentro de la fase externa refrigerada, pero este método es en general más costoso, y se aplica únicamente a casos particulares.

Por otra parte, las emulsiones de alto contenido de fase interna tienen un principio de formación diferente, ya que en la mayoría de los casos, se busca obtener local y/o transitoriamente una relación aceite/agua considerablemente diferente a aquella que

corresponde al sistema global y/o final. Este es el caso de emulsiones O/W que se forman añadiendo poco a poco el aceite a una fase acuosa en agitación, obteniéndose el tipo de emulsión deseada (O/W con alto contenido de fase interna), cualquiera sean las condiciones fisicoquímicas.

Un artificio volumétrico para formar este tipo de emulsiones, es producir localmente una alta relación agua/aceite a pesar de que sea lo contrario al sistema global. El aparato propuesto por Nagata, permite producir emulsiones O/W con muy alto contenido de fase interna. Consiste en agitar con el impulsor en posición baja (cercano al fondo) dentro del recipiente donde se realiza la agitación, obteniéndose localmente una alta relación agua/aceite; posteriormente se sube poco a poco el impulsor para incorporar el resto del aceite.

Finalmente, conviene mencionar que no se recomienda aplicar demasiado cizallamiento, para evitar favorecer una eventual inversión de fase de la emulsión. Esta recomendación no es general, depende de cada caso, ya que pudiese ocurrir que un aumento en la intensidad de agitación compensase en parte la relación agua/aceite desfavorable.

Fluodinámica de la emulsificación

La palabra emulsificación se refiere a los cambios y operaciones físicas, asociadas a la preparación de una emulsión. Una mezcla de dos líquidos inmiscibles en reposo o en derrame laminar, tiende a separarse en dos fases distintas, es decir, en el sistema de menor energía interfacial. Al aplicarle una cierta cantidad de energía, el sistema puede volverse inestable y la mezcla se transforma en una dispersión de una fase en la otra. ⁽¹¹⁾

El trabajo necesario para lograr esta dispersión, se aminora utilizando los agentes emulsionantes o surfactantes, los cuales se orientarán en la interfase líquido-líquido de tal manera que se reduzca al mínimo la energía libre interfacial. Si se calcula el

trabajo necesario para la formación de una emulsión en presencia de un agente emulsificante, y se compara con el mismo caso en ausencia de este agente, se encuentra que la energía necesaria para formar la emulsión pudiese reducirse (en los casos más favorables) a un 2% de la cantidad de trabajo inicial (sin emulsificante).⁽¹⁷⁾

Para entender la complejidad del proceso de emulsificación basta con examinar lo que ocurre a una gota que circula dentro de un tanque agitado. Cuando la gota pasa cerca del impulsor, está sometida a un fuerte cizallamiento, que depende de la forma y velocidad de rotación del mismo. Como resultado de esto puede haber un estiramiento más o menos pronunciado de la gota dependiendo de la tensión interfacial, la cual depende a su vez de la adsorción de surfactante, de la viscosidad de los fluidos (una propiedad física), y de la presencia de otras gotas en la cercanía (composición). La combinación de estos efectos con la intensidad y la duración del cizallamiento produce o no la ruptura en dos o más gotas.

Luego al alejarse del impulsor, la gota está “viajando” cerca de sus vecinas con una velocidad relativa muy pequeña y puede producirse la coalescencia. Este fenómeno depende del tamaño de las gotas, de la cantidad de gotas presentes (composición), de la facilidad con la cual se pueden desplazar (viscosidad del medio), de la repulsión al acercarse (formulación), de la temperatura, del patrón y la velocidad de flujo, etc. Obviamente el tamaño de las gotas producidas dependerá entonces del equilibrio dinámico entre la ruptura y la coalescencia, el cual se ve afectado por decenas de variables.

La emulsificación es tan compleja que no hay forma de analizarla de manera global. La mayoría de los resultados conocidos se refieren a tendencias observadas cuando se cambia una sola variable a la vez, cosa que no es siempre fácil de llevar a cabo. Por lo tanto, se puede decir que nada está seguro y que todo es relativo en lo referente al estudio de la formación de emulsiones. Es por eso también que ciertos protocolos de

fabricación siguen recetas complicadas donde se combinan en forma secuencial diferentes tipos de efectos. ⁽¹³⁾

Analizando la operación de emulsificación desde un punto de vista microscópico, se pueden mencionar varias teorías que describen el proceso de formación de las gotas de un líquido en el seno del otro, las cuales se aplicarán según sean las características de los fluidos involucrados y las condiciones de operación al momento de formar la emulsión. Estas teorías son presentadas a continuación: ⁽¹¹⁾

1. Deformación y ruptura de una gota por cizallamiento: Cuando se aplica un esfuerzo no uniforme sobre una gota, ésta se deforma y puede eventualmente romperse. Dicha deformación y ruptura puede ocurrir bajo el efecto de diferentes tipos de patrones de flujo, tales como cizallamiento de tipo Couette plano, tipo giratorio y tipo hiperbólico. A continuación, la figura N° 2 resume los casos de deformación y ruptura en un campo de cizallamiento de tipo Couette plano; resultados semejantes se obtuvieron para flujo hiperbólico.

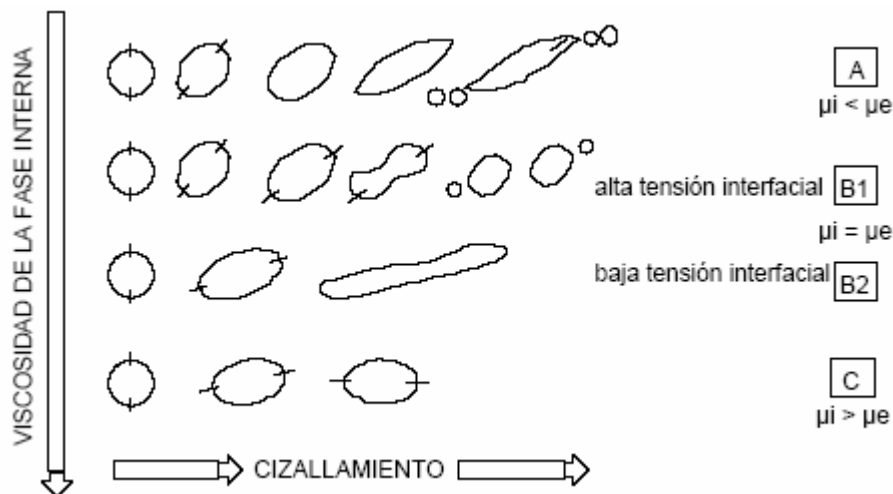


Figura N° 2: Deformación y ruptura de una gota en un campo de cizallamiento Couette, en función de la viscosidad (μ) de las fases (i: interna, e: externa), y de la intensidad del cizallamiento. ⁽¹¹⁾

De izquierda a derecha aumenta el cizallamiento, mientras que de arriba a abajo aumenta la relación entre la viscosidad de la fase interna y la viscosidad de la fase externa. En el primer caso (A), cuando la fase interna es menos viscosa que la fase externa, el aumento de cizallamiento produce primero una elongación de la esfera a lo largo de un eje inclinado a 45 grados. Cuando sigue aumentando el cizallamiento, la gota se alarga en forma sigmoide con puntas relativamente agudas; estas puntas son inestables frente a las fuerzas inerciales y por lo tanto se rompen en gotitas. Para sistemas de baja tensión interfacial, las fuerzas inerciales son muy bajas y la elongación sin ruptura puede ser considerable. En el segundo caso (B1 y B2), cuando las viscosidades de las dos fases son similares, la deformación no se hace con puntas, sino en forma de cilindro, el cual se vuelve también inestable por acción de las fuerzas inerciales, con formación de dos gotas principales, eventualmente acompañadas de gotitas secundarias. En el tercer caso (C), cuando la viscosidad de la fase interna supera notablemente a la de la fase externa, la gota no sufre un alargamiento notable (en particular si la tensión es alta), y se forma un elipsoide orientado en la dirección del cizallamiento.

2. Ruptura de una estructura muy alargada: En varios tipos de inestabilidades y/o como resultado de una deformación o de un proceso de inyección, la fase interna puede asumir una forma muy alargada, parecida a un cilindro. Dichas estructuras alargadas no son en general estables frente a perturbaciones inerciales. Se ha demostrado, que si la longitud de onda de la perturbación excede el perímetro de la columna líquida, dicha perturbación aumenta y produce la ruptura de la columna por varices. El grado de inestabilidad máxima ocurre para longitudes de onda del orden de cuatro veces el perímetro de la columna; por lo tanto, esto permite calcular las condiciones de ruptura, y así estimar el tamaño de las gotas resultantes. A continuación, en la figura N° 3, puede observarse la deformación y ruptura de una estructura alargada.

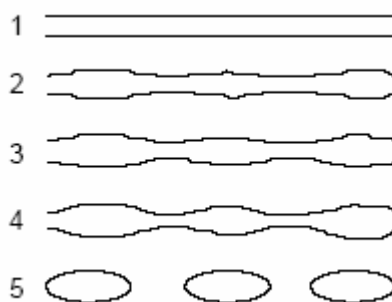


Figura N° 3: Deformación “varicosa” y ruptura de un hilo líquido. El tiempo crece de arriba a abajo. ⁽¹¹⁾

3. Ruptura por turbulencia isotrópica: La mayoría de los trabajos de modelaje de los fenómenos dinámicos, tales como emulsificación y coalescencia, están basados sobre los modelos de turbulencia isotrópica, ya que el método de perturbación no puede en general describir sino el inicio de la inestabilidad. Se considera la turbulencia como un flujo de fluctuaciones de remolinos aleatorios, superpuestos a un flujo medio global. El modelo asume una cascada de disipación energética desde los remolinos más grandes (del tamaño del tanque), hasta los más pequeños, que pierden su energía por disipación viscosa. La noción de isotropía implica que las fluctuaciones de velocidad son independientes de cualquier dirección de referencia. En un campo de turbulencia isotrópica, las gotas están sometidas a cizallamiento y a deformación inercial de su superficie; si la deformación sobrepasa un cierto valor, la gota se rompe.

Propiedades de las Emulsiones y su Medición

Las principales propiedades de las emulsiones son : la conductividad (a través de la cual se puede determinar el tipo de emulsión: O/W o W/O), la distribución estadística del tamaño de gota, la estabilidad en el tiempo para condiciones particulares de almacenamiento, transporte o manipulación, y la viscosidad o mejor dicho su comportamiento reológico, ya que en muchos casos la emulsiones no son fluidos newtonianos.

En realidad es a veces difícil lograr una combinación de propiedades definidas, debido a que no son siempre independientes las unas de las otras. En la situación actual, el problema científico/técnico es lograr obtener las propiedades deseables mediante el ajuste o la manipulación de las variables disponibles, que son las de formulación, composición y aquellas fluodinámicas que permitan describir las condiciones del proceso de mezclado requerido para producir una dispersión. La situación se complica porque estas variables no son sólo dependientes, sino que a menudo contribuyen a producir efectos opuestos .⁽¹³⁾

Conductividad eléctrica

Cuando a una solución electrolítica se le aplica una diferencia de potencial, sus iones son instantáneamente atraídos hacia el electrodo de carga opuesta, generándose una corriente cuya intensidad depende de la resistencia del medio , de la densidad de los transportadores de carga y de la geometría de la celda y los electrodos .⁽¹⁴⁾

Se define la conductancia de una solución, como el inverso de su resistencia eléctrica y la conductancia específica o conductividad como el inverso de la resistividad. La conductividad es la conductancia de un cubo de solución de arista igual a la unidad. Una solución salina al 1% de Cloruro de Sodio posee una conductividad del orden 0,01 Siemens por centímetro (S/cm) o 10 mS/cm, mientras que las conductividades de las sustancias aceitosas u orgánicas son del orden de algunos μ S/cm, es decir, mil veces más pequeñas.

Por lo anterior, las conductividades de las dos fases que conforman una emulsión son en general muy diferentes, puesto que la fase acuosa contiene siempre algo de electrolito disuelto. Por otra parte, la conductividad de la emulsión depende esencialmente de la naturaleza de la fase continua o externa, puesto que ésta es la fase que va a transportar las cargas. En efecto, la fase interna no tiene continuidad entre los electrodos.⁽¹¹⁾

Debido a la salinidad de la fase acuosa, la conductividad eléctrica de las emulsiones O/W, es entre cien y mil veces mayor que la de emulsiones W/O, dependiendo siempre de la concentración de electrolito presente en la fase acuosa. Esta característica permite deducir inmediatamente el tipo de una emulsión a partir de la medición de su conductividad. ⁽¹⁴⁾

Es importante destacar que en ciertos sistemas W/O de alto contenido de fase interna, se pueden formar cadenas de gotas de agua entre los electrodos, produciéndose un aumento considerable de conductividad a lo largo de estas cadenas. Este fenómeno es llamado percolación, y generalmente se produce en sistemas con ausencia de agitación. A continuación, en la figura N° 4, se muestran las cadenas de gotas que propician este fenómeno.

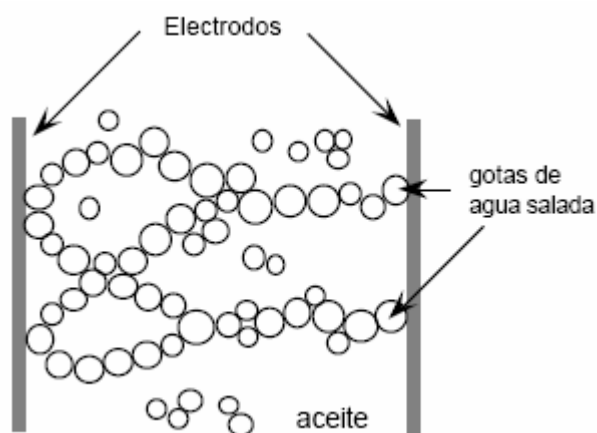


Figura N° 4: Percolación en emulsiones W/O. ⁽¹¹⁾

En la práctica se ha encontrado que en un medio emulsionado agitado constantemente, la conductividad de una emulsión O/W varía esencialmente en forma proporcional al contenido de agua. Este resultado permite detectar fácilmente una emulsión múltiple de tipo W/O/W. En tal emulsión una fracción del agua sirve de fase externa y, por lo tanto, contribuye a la conducción, mientras que la fracción restante de agua, incluida en las gotas de aceite, no participa en este fenómeno. ⁽¹¹⁾

Medición de la conductividad eléctrica ⁽¹⁸⁾

La medición de la resistencia y, por consiguiente, de la conductividad de una solución electrolítica, puede llevarse a cabo con el circuito de puente de Wheastone. Existen también aparatos con los cuales puede medirse la conductividad de una solución, llamados conductímetros. Éstos, bien sean manuales o automáticos, se basan en un puente de Wheastone y deben tener corrección automática o manual para la temperatura, ya que las lecturas (analógicas o digitales) se refieren a 25° C.

Distribución de tamaño de gotas

En lo relacionado al tamaño de las gotas, el aspecto más general a recalcar es que en una misma emulsión, el tamaño de las gotas dispersas no es el mismo para todas ellas, es decir, la emulsión no tiene una fase uniformemente dispersada pues las gotas se forman y acomodan de distinta manera, lo que conlleva a que tengan distintos tamaños generando una distribución. ⁽¹⁹⁾

Las emulsiones ordinarias se caracterizan algunas veces a partir del diámetro promedio de sus gotas; sin embargo, sus propiedades no sólo dependen de este parámetro, y la única forma de describir la geometría de la emulsión es por la distribución de tamaño de gotas de la fase dispersa. Este es, por consiguiente, uno de los factores más importantes a considerar en la elaboración de emulsiones. Se ha encontrado que existe una distribución de tamaño óptima según cual sea la aplicación, ya que ésta influye directamente sobre propiedades importantes como la viscosidad y la estabilidad de la emulsión. ⁽²⁰⁾

El tamaño promedio de gota puede calcularse de diferentes formas, según el fenómeno de interés se relacione con el número de gota, su superficie o su volumen. En cada caso, se utiliza el algoritmo adecuado. Se divide la escala de diámetro en diferentes clases (intervalos) y se cuenta el número de gotas correspondientes a cada clase, cuyo diámetro representativo es en general el centro del intervalo. La frecuencia relativa o fracción de ocurrencia, se define como el número de gotas

pertenecientes a una clase, dividido por el número total de gotas. Si se hace la analogía con los conceptos clásicos de estadística, esta frecuencia relativa corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un determinado diámetro representativo.

El gráfico correspondiente al número de gotas en función del diámetro se llama histograma, y el gráfico acumulado o integral del anterior se llama histograma acumulativo. La experiencia muestra que si la emulsión ha sido producida por un proceso de agitación único, su distribución de tamaño de gota se aproxima a una ley normal o log-normal. A continuación, en la figura N° 5, se muestran ejemplos de estos gráficos. ⁽¹¹⁾

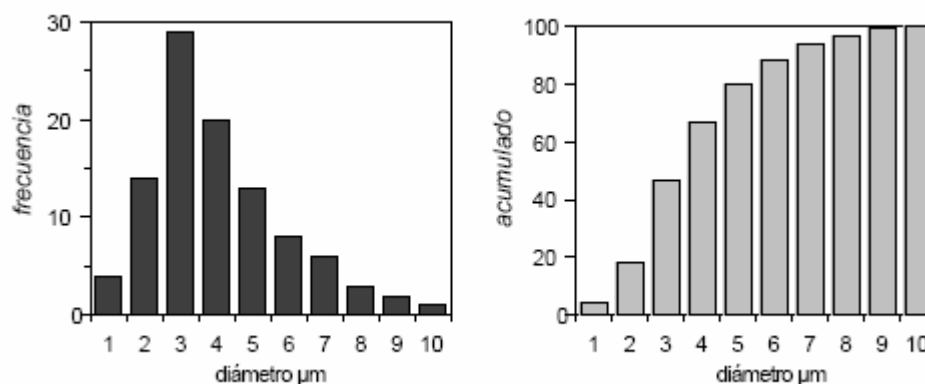


Figura N° 5: Histogramas diferencial y acumulativo de una distribución de tamaño de partículas. ⁽¹¹⁾

Determinación de la distribución de tamaño de gotas ⁽¹¹⁾

Se puede determinar la distribución de tamaño de gotas de una emulsión por varios métodos experimentales, basados en fenómenos físicos. Se pueden clasificar por un lado, en métodos “globales” que se basan sobre una propiedad promedio del sistema, y que por lo tanto dan solo un diámetro equivalente; por otro lado están los métodos “individuales” que consideran las propiedades a la escala de la gota, y que mediante un análisis estadístico, llevan a la distribución de tamaño. Se hace énfasis en la segunda categoría, la cual puede subdividirse de acuerdo con los fenómenos

involucrados: microscopia y análisis de imagen, dispersión y difracción de radiación, propiedades eléctricas, entre otros.

En el caso de este estudio, se emplea un analizador de tamaño por difracción de luz láser, ya que existe experiencia en estudios similares que confirma que este tipo de equipos es adecuado para la aplicación. Su funcionamiento consiste en lo siguiente: cuando un haz paralelo de luz coherente monocromática (láser) pasa a través de una zona que contiene gotas, se forma un patrón de difracción superpuesto a la imagen mucho más amplio que aquella. Si se coloca una lente convergente después de la zona que contiene la emulsión y se ubica una pantalla en el plano focal del lente, la luz no difractada forma una imagen en el foco, y la luz difractada forma un conjunto de anillos concéntricos alternativamente blancos y negros, llamado patrón de Fraunhofer. A partir de la información detectada, se puede calcular (con un algoritmo que exige el uso de una computadora) la distribución de tamaño de gotas presentes en la emulsión. Al cambiar la distancia focal del lente, se puede cubrir un rango de tamaño entre $1\text{ }\mu\text{m}$ y $2000\text{ }\mu\text{m}$, siendo mucho mayor que aquel de los demás aparatos. Las ventajas de este tipo de aparato son múltiples: no es un método destructivo, ya que no se altera la emulsión; el sistema a analizar está contenido en un recipiente de vidrio y no está en contacto con ninguna parte del aparato, es decir, que no hay problemas de limpieza ni de taponamiento; y por otra parte, el principio no es de conteo secuencial, sino de detección paralela en los canales, durante una fracción de segundo. El análisis de los datos relativos a miles de gotas requiere solo algunos pocos segundos en los aparatos modernos. Sin embargo, su principal inconveniente es que su costo es muy elevado. A continuación, en la figura N° 6, se muestra un analizador de tamaño por difracción de luz láser.



Figura N° 6: Analizador de tamaño por difracción de luz láser. ⁽¹⁹⁾

Estabilidad ⁽¹⁴⁾

Una emulsión es por definición un sistema termodinámicamente inestable y tarde o temprano debe separarse en dos fases. La estabilidad de las emulsiones se refiere a la resistencia que presentan a la coalescencia de las gotas de la fase dispersa o interna.

La floculación es la primera etapa en la ruptura de una emulsión, entonces retardar la floculación equivale a aumentar la estabilidad, aunque no en forma necesariamente proporcional porque la estabilidad puede depender en mayor grado de la etapa siguiente. Una emulsión no se considera rota hasta que coalesce después de flocular. En esta primera etapa, la de floculación, las gotas de la fase dispersa forman agregados sin perder completamente la identidad, por lo que dicha agregación es con frecuencia reversible.

En la segunda etapa, llamada coalescencia, cada agregado se combina para formar una gota simple; este proceso es esencialmente irreversible y conduce inicialmente a una disminución en el número de gotas, y finalmente a la total demulsificación. La etapa de coalescencia incluye el drenaje de la película ubicada entre las gotas, por esto es la etapa más lenta en la ruptura de emulsiones, y usualmente la que determina su estabilidad.

Los factores que controlan el proceso de coalescencia, son aquellos que influyen en el adelgazamiento y ruptura de la película. A continuación se presenta un análisis básico de la influencia de los factores más relevantes:

1. Naturaleza física de la película interfacial: Se refiere a la resistencia mecánica para el drenaje, por parte de la película. Una resistencia máxima se consigue en películas compuestas por fluidos altamente elásticos y condensados, aún más cuando están acompañados por moléculas de surfactante.
2. Existencia de impedimentos eléctricos o estéricos: Dobles capas eléctricas se generan en aquellos sistemas estabilizados con surfactantes iónicos y cuyas fases continuas contienen electrolitos. Éstas actúan retardando el flujo de la película, a través de las fuerzas de atracción de cargas opuestas; así como también dificultan la aproximación de las gotas que poseen la misma carga, la cual se debe a la adsorción del surfactante en la interfase. Por otro lado, la barrera estérica se origina por la hidratación de los grupos hidrofílicos del surfactante en el caso de las emulsiones O/W. En las emulsiones W/O, la barrera estérica está formada por largas cadenas hidrocarbonadas extendidas hacia la fase oleica. Cuando se trata de surfactantes no iónicos de alto peso molecular, la barrera estérica existe a ambos lados de la interfase.
3. Naturaleza y concentración del surfactante: El tiempo de “vida” de las gotas que forman una emulsión, se ve influenciado en gran magnitud por el efecto que tiene el tipo y concentración de surfactante sobre la velocidad de adelgazamiento de la película interfacial. Experimentalmente se ha comprobado que la estabilidad de las emulsiones crece rápidamente con la dimensión molecular de los agentes emulsionantes. La mezcla de surfactantes por grupos estéricos de tamaño variable, tiende a aumentar el alcance del efecto y a menudo aumentar la estabilidad. Por otra parte, la presencia de surfactante es determinante en los fenómenos interfaciales dinámicos que tienden a retardar el

drenaje de la película: a mayor carga superficial, mayores serán: el efecto electro-viscoso, la interacción de las moléculas de surfactantes entre si, la viscosidad interfacial y la interacción entre el surfactante absorbido y el fluido de la película.

4. Viscosidad de la fase continua: Esta propiedad determina la frecuencia de las colisiones entre las gotas, a través del coeficiente de difusión de las mismas. Un incremento en la viscosidad de la fase continua, reduce dicho coeficiente y consecuentemente retarda la coalescencia. Por esta razón, muchas veces son añadidos agentes espesantes a la fase externa de la emulsión.
5. Distribución de tamaño de gotas: Las emulsiones son más estables cuando menor sea el tamaño de las gotas, así como también cuanto más estrecha sea la distribución de dichos tamaños (tendencia a la mono-dispersidad).
6. Relación de volúmenes de fases: Cuando la fase interna constituye menos del 30% del volumen total, las gotas individuales no interfieren entre si; sin embargo, al aumentar el volumen de fase interna, las gotas comienzan a chocar más frecuentemente. Cuando la fase interna del sistema se aproxima al 74% del volumen total, las gotas están densamente empacadas y pierden su especificidad, a menos que la emulsión sea poli-dispersa. Por encima del 85% de fase interna, el empacamiento de las gotas es excepcionalmente denso y las fuerzas de presión son muy altas, lo que favorece al drenaje de la fina película interfacial, todo lo cual contribuye a acelerar la coalescencia.
7. Temperatura: Los cambios de temperatura afectan considerablemente la estabilidad de las emulsiones, a través de su influencia sobre parámetros como: la tensión interfacial, la naturaleza y viscosidad de la película interfacial, la viscosidad de las fases y la agitación térmica de las gotas dispersadas. Comúnmente, la tendencia experimental es la siguiente: a mayor temperatura

más rápidamente ocurre el fenómeno de coalescencia y, por lo tanto, se disminuye la estabilidad de la emulsión.

Medición de estabilidad

Es relativamente fácil decir que una emulsión se ha roto, pero es difícil definir experimentalmente un valor de su estabilidad. La única medida realmente absoluta de la estabilidad de una emulsión es la variación del número de gotas en función del tiempo. Tal información se puede obtener experimentalmente mediante la variación de la distribución del tamaño de gota con el tiempo. Desde el punto de vista experimental tal medición implica la toma de una muestra o la dilución del sistema completo con un gran exceso de fase externa. Las limitaciones básicas son las siguientes: el resultado del primer método depende considerablemente de la posición del muestreo y el segundo puede emplearse una sola vez, porque altera el estado del sistema.⁽²¹⁾

Además de la distribución de tamaño de gotas, existen técnicas experimentales empleadas para una medición indirecta de la estabilidad de la emulsión, entre ellas se encuentran la medición de los siguientes parámetros: tensión superficial, potencial eléctrico, turbidez y viscosidad.

Viscosidad y comportamiento reológico

La viscosidad es la propiedad que caracteriza la resistencia de un fluido a desplazarse. Se define a partir de un caso simple en el cual un fluido se ubica entre dos láminas paralelas ubicadas a una cierta distancia (y) la una de la otra, donde una de ellas se mantiene fija, mientras que la otra se pone en movimiento (paralelamente a la primera) al aplicarse una fuerza (F) (ver figura N° 7).

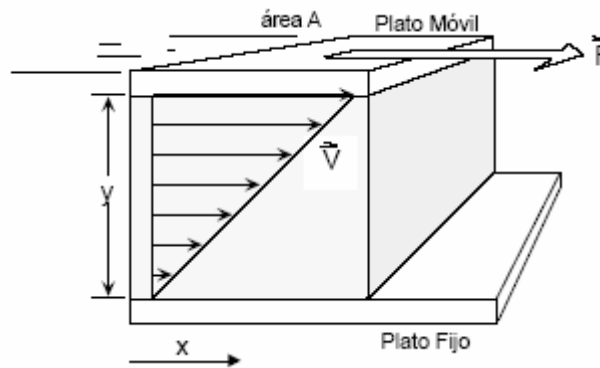


Figura N° 7: Definición del concepto de viscosidad. ⁽¹¹⁾

Siendo V la velocidad de la lámina y A el área correspondiente, se obtiene la siguiente relación, mostrada en la ecuación N° 2:

$$\frac{F}{A} = \eta \cdot \frac{V}{y} \quad (2)$$

Donde η se define como el coeficiente de viscosidad. A partir de este caso llevado al límite diferencial, se deriva una fórmula más general (ecuación N° 3):

$$\tau \cdot y \cdot x = -\eta \cdot \frac{dv_x}{dy} \quad (3)$$

Donde τ es el esfuerzo ejercido en la dirección x . Por otra parte, v_x representa el componente en la dirección x de la velocidad. Su derivada respecto a y es el gradiente de velocidad, llamado velocidad de deformación o cizallamiento. Estas ecuaciones son válidas sólo en el caso de la geometría considerada. Se encontrarán las expresiones correspondientes para varios tipos de coordenadas según sea el caso.

La reología es la rama de la física que estudia el comportamiento de los fluidos sometidos a diferentes tipos de esfuerzos. Si existe una relación lineal entre el esfuerzo y el cizallamiento (coeficiente η constante), se dice que el fluido es

newtoniano, este el caso de la mayoría de los fluidos simples; por el contrario, las emulsiones o suspensiones presentan a menudo un comportamiento llamado pseudo-plástico. Tal comportamiento se caracteriza por una disminución de la viscosidad a medida que el cizallamiento aumenta, por esto se deben especificar las condiciones de cizallamiento cuando se indica un valor de viscosidad. ⁽¹¹⁾

La viscosidad de una emulsión depende de numerosos factores, algunos con carácter físico más o menos determinado, otros de tipo físico-químico cuyo efecto empieza solamente a entenderse. A continuación se presentan estos factores y su influencia en la viscosidad de las emulsiones: ⁽²¹⁾

1. Viscosidad de la fase externa: Todos los modelos teóricos o empíricos indican una relación de proporcionalidad entre la viscosidad de la emulsión y la viscosidad de la fase externa, la cual contiene en general el agente emulsionante. Tal relación es obvia a baja proporción de fase interna, cuando la presencia de las gotas de la fase interna produce sólo una interacción adicional. Sin embargo, a alto contenido de fase interna (mayor al 70%) es probable que esta relación ya no sea válida porque la estructura de la fase externa es extremadamente fraccionada y, porque el sistema es altamente no newtoniano y se mide solo una viscosidad aparente promedio, que varía con el cizallamiento.
2. Proporción volumétrica de la fase interna: Este es obviamente un factor de primera importancia en la viscosidad de los sistemas emulsionados. En efecto, es perfectamente razonable desde el punto de vista intuitivo considerar que a mayor contenido de gotas, mayores interacciones entre gotas y, por lo tanto, mayor viscosidad. La experiencia muestra que la viscosidad de una emulsión aumenta como un polinomio para valores intermedios de porcentaje de fase interna y luego como una exponencial para los valores altos. Para dar cuenta de tales resultados se han propuesto varias relaciones empíricas cuya precisión no

puede determinarse porque al aumentar el contenido de fase interna, la emulsión se torna siempre pseudo-plástica.

3. Tamaño de las gotas de la fase interna: Ambos, tamaño de gotas y su distribución, tienen una influencia sobre la viscosidad de las emulsiones. Estudios experimentales han permitido corroborar las siguientes tendencias: cuando menor el tamaño de gota, mayor la viscosidad y cuando más amplia la distribución de tamaño de gota, menor la viscosidad. Cuando se mezclan dos emulsiones del mismo contenido de fase interna, pero de tamaños muy diferentes, la distribución resultante presenta dos picos (emulsión bimodal). Si estos dos picos son suficientemente separados se puede obtener una reducción considerable de la viscosidad, la cual se debe a que las gotas pequeñas se ubican entre las grandes; en este caso, la viscosidad de la emulsión resultante es menor que ambas viscosidades iniciales.
4. Viscosidad de la fase interna: Este factor juega un papel importante sólo cuando existe un movimiento de convección dentro de las gotas. Este movimiento es por lo general despreciable, en particular si la viscosidad de la fase interna es mucho mayor que la viscosidad de la fase externa. Para emulsiones de aceites muy viscosos en agua, se halló que la viscosidad de la fase interna no tiene prácticamente ninguna influencia.
5. Efectos electro-viscosos: Al presentarse una doble capa eléctrica en el exterior de las gotas, el movimiento de la fase externa situada entre dos gotas puede estar retrasado por fenómenos electro-viscosos. Específicamente, el drenaje de una película de fase externa entre dos gotas vecinas, arrastra cargas eléctricas de la doble capa y produce un efecto llamado potencial de flujo, cuyo resultado es un flujo inverso. Estos efectos aumentan la viscosidad de la emulsión, de una forma a veces notable, comparable a un 50% de aumento en el porcentaje volumétrico de fase interna.

6. Efecto del emulsionante, es decir, de la formulación: Al aumentar la concentración de emulsionante, disminuye el tamaño de gota con el resultante aumento de viscosidad. Sin embargo, estudios recientes han mostrado que la viscosidad puede estar considerablemente afectada por la formulación. En realidad parece que la viscosidad de la emulsión es extremadamente baja para los sistemas de tensión interfacial muy baja; el tamaño de gota de tales sistemas debe ser muy pequeño, pero la velocidad de coalescencia es también muy rápida. Se piensa que con una muy baja tensión interfacial, las gotas pueden alargarse paralelamente a las líneas de flujo y así reducir considerablemente sus interacciones.

Medición de viscosidad

Es importante tener en cuenta que no existe ningún aparato universal que sirva para medir la viscosidad de todo tipo de fluidos, ya que por ejemplo los valores de viscosidad para fluidos newtonianos se encuentran comprendidos en un rango entre 10^{-5} y 10^{14} poises. Para la selección del viscosímetro más adecuado deben tenerse en cuenta: el objetivo de la medida, la precisión necesaria y la zona del diagrama reológico que interesa. ⁽²²⁾

Según la geometría del sistema y de la parte móvil, se tienen diferentes aparatos utilizados para medir la viscosidad de un fluido, entre los cuales se pueden citar: viscosímetros capilares, basados en el movimiento de un volumen fijo de fluido a través de un tubo de diámetro pequeño; viscosímetros de caída libre, que se basan en la caída de un objeto a través de un fluido, y en que el tiempo necesario para ello depende de la viscosidad del líquido; y otros viscosímetros menos utilizados como los de placas deslizantes, coaxiales, de cinta y ultrasónicos.

Para medir la viscosidad de las emulsiones de aceite en agua que son de interés en este estudio, se emplean comúnmente viscosímetros rotacionales o rotatorios. Existen varios tipos de viscosímetros rotacionales, pero en general todos se basan en una

medición del torque de un eje o cilindro rotatorio, para determinar la resistencia al flujo por parte del líquido. Estos son los viscosímetros más utilizados por ser los más versátiles de todos; siendo el viscosímetro Brookfield el más popular, ya que determina un amplio rango de viscosidades a diferentes velocidades de corte. A continuación, en la figura N° 8, se muestra un viscosímetro rotacional de Brookfield.



Figura N° 8: Viscosímetro rotacional de Brookfield. ⁽¹⁷⁾

Surfactantes

Una sustancia anfífila es aquella que tiene una doble afinidad, la cual se define desde el punto de vista fisicoquímico como una doble característica a la vez polar y apolar. Típicamente un anfífilo está conformado por una molécula que se puede dividir en dos partes: un lado polar que contiene átomos, tales como Oxígeno, Azufre, Nitrógeno o Fósforo, y otro lado constituido por un grupo apolar que en general es un hidrocarburo parafínico, ciclo-parafínico o aromático. La parte polar tiene afinidad para los solventes polares, particularmente el agua; mientras que la parte apolar tiene afinidad para los solventes orgánicos, como hidrocarburos, aceites o grasas. Por esta razón, la parte polar se denomina hidrofílica, mientras que a la parte apolar le corresponde el calificativo de lipofílica o hidrófoba.

Debido a su doble afinidad, una molécula anfífila no se encuentra cómoda ni en solvente polar, ni en solvente orgánico. Para satisfacer ambos tipos de afinidad, el

grupo polar debe estar solvatado por un solvente polar, mientras que el grupo apolar debe encontrarse en un solvente orgánico, o por lo menos fuera del solvente polar. Tales condiciones ocurren solamente en la frontera de dos fases, bien sea entre una fase condensada y un gas (superficie), o entre dos fases condensadas (interfase), como es el caso de los sistemas líquido-líquido (inmiscibles). Ya que las sustancias anfífilas tienen una fuerte tendencia a migrar hacia una superficie o una interfase (adsorción), se han denominado también surfactantes como contracción de las palabras inglesas *surface-active substances*.⁽²³⁾

La adsorción de un surfactante en una superficie o interfase, produce en general una reducción de la tensión superficial o interfacial, por lo que se le da el nombre de tensoactivo. La tensión es responsable de la curvatura de las interfases, de la formación de gotas, de un gran número de inestabilidades capilares y de numerosos fenómenos de estabilización. El descenso de la tensión superficial o interfacial, según sea el caso, favorece la deformación y ruptura de la frontera entre las dos fases; por lo tanto, favorece la formación de sistemas dispersos como las emulsiones o las espumas.⁽²⁴⁾

Hoy el mercado de los surfactantes presenta una gran variedad, tanto desde el punto de vista de la estructura química de las moléculas como de su costo. Las materias primas utilizadas en su fabricación tienen orígenes diversos, y su transformación puede seguir un camino simple o complejo dependiendo del caso. Se clasifican las materias primas para la fabricación de surfactantes según su origen: natural, sintético, o a partir de un corte petrolero; esta clasificación corresponde también al orden cronológico.⁽²⁵⁾

Tipos de Surfactantes

Desde el punto de vista comercial los surfactantes se pueden clasificar según su propiedad de mayor interés práctico: jabón, detergente, emulsionante, bactericida, inhibidor de corrosión, dispersante, tensoactivo, humectante, etc. Sin embargo, la

mayoría de los surfactantes poseen varias de estas propiedades a la vez y, por lo tanto, es necesario clasificarlos de acuerdo a su tipo de molécula, más particularmente en base al tipo de disociación de su molécula en solución acuosa. A continuación se presentan los diferentes tipos de surfactantes de acuerdo a esta clasificación .⁽²³⁾

Surfactantes aniónicos

En solución acuosa, los surfactantes aniónicos son aquellos que se disocian en un anión anfífilo y un catión, el cual es en general un metal alcalino o un amonio cuaternario. En este tipo de compuesto las propiedades de actividad superficial o interfacial se deben a la presencia de este anión. La producción de los surfactantes aniónicos representa alrededor del 55% de los surfactantes producidos anualmente en el mundo.⁽²⁵⁾

Generalmente, los surfactantes aniónicos contienen uno de los siguientes grupos polares solubles: carboxilato, sulfonato, sulfato o fosfato, combinado con una cadena hidro-carbonada hidrófoba. Si esa cadena es corta son solubles en agua, en caso contrario, tienen baja hidro-solubilidad y se emplean en sistemas no acuosos como aceites lubricantes.⁽²⁶⁾

Entre los surfactantes aniónicos más utilizados se encuentran: los jabones que son sales de sodio o de potasio de los ácidos grasos, siendo los de uso más antiguo; los productos sulfatados que se fabrican a partir de alquil-bencenos, alfa-olefinas, y alcoholes con o sin grupos de óxido de etileno; y los alquil aril sulfonatos cuyo núcleo aromático puede ser benceno, tolueno, xileno o un aromático policíclico.⁽²⁷⁾

Surfactantes no iónicos

Por orden de importancia industrial, los surfactantes no iónicos vienen justo después de los aniónicos, y hoy en día su producción está aumentando hasta alcanzar casi el 40% del total. En solución acuosa no se ionizan, ya que su parte hidrofílica está formada por grupos polares no ionizados como: alcohol, fenol, éter o amida; por lo

tanto, son compatibles con los demás tipos de surfactantes y pueden integrarse en formulaciones complejas. Por otra parte, estos surfactantes son menos sensibles a los electrolitos, y pueden por lo tanto ser utilizados en presencia de una salinidad alta. ⁽²⁵⁾

Los surfactantes no iónicos son en general buenos detergentes, humectantes y emulsionantes. Algunos de ellos tienen excelentes propiedades espumantes. Existen diferentes tipos de surfactantes no iónicos, pero el mercado está dominado (70%) por los derivados que contienen una cadena poli-óxido de etileno fijada sobre un grupo hidroxilo o amina.

Los alcoholes lineales utilizados en la fabricación de surfactantes no iónicos provienen de varias fuentes, pero en general se trata de utilizar alcoholes suficientemente lineales para asegurar una biodegradación rápida. ⁽²⁸⁾ Los alcoholes secundarios, que poseen el grupo hidroxilo en el segundo carbono de la cadena, se obtienen por hidratación de olefinas en medio sulfúrico. La reacción de poli-condensación de óxido de etileno sobre un alcohol anhidro (bien sea primario o secundario) se realiza en presencia de un catalizador alcalino, en ausencia de aire y con muchas precauciones. La probabilidad de condensación es la misma sobre las moléculas de alcohol que sobre aquellas que están ya etoxiladas, sea cual sea el grado de etoxilación. Se obtienen así surfactantes de una amplia distribución de pesos moleculares.

Por otra parte, los alquil fenoles etoxilados son surfactantes no iónicos que se producen por alquilación de fenol con una cloro parafina (de ser posible lineal), o por sustitución de una olefina en el núcleo aromático. Si se colocan entre 12 y 20 grupos óxido de etileno se obtienen agentes humectantes y emulsionantes. Como se sabe que los grupos alquilo no lineales no son biodegradables, la tendencia actual es sustituir estos productos por alcoholes etoxilados.

Otros compuestos orgánicos que actúan como surfactantes no iónicos son los tioles etoxilados y los ésteres de ácidos grasos como: los poli-etoxiésteres, ésteres de glicerol, ésteres de hexitoles y de anhidro-hexitoles cíclicos. También existen surfactantes no iónicos nitrogenados de tipo amina etoxilada, es decir, una amina grasa que puede recibir una o dos cadenas de poli-óxido de etileno. ⁽²⁵⁾

Surfactantes catiónicos

En solución acuosa, los surfactantes catiónicos son aquellos que se disocian en un catión orgánico anfífilo y un anión generalmente del tipo halogenuro. La fabricación de estos surfactantes es mucho más costosa que la de los aniónicos y los no iónicos, por esta razón no se les utiliza salvo en el caso de aplicaciones especiales, donde la carga positiva del anfífilo produce ventajas como en enjuagues o emulsiones asfálticas. ⁽²⁵⁾

Los surfactantes catiónicos representan, en cuanto a su consumo, la tercera categoría con aproximadamente 5% del total, es decir, considerablemente menos que los surfactantes aniónicos y no iónicos. En general no son buenos detergentes y tampoco buenos espumantes, con excepción de los óxidos de amina en su forma cuaternizada a pH ácido. No se usan en formulaciones con surfactantes aniónicos, ya que no son compatibles con éstos y forman compuestos insolubles. Sin embargo, tienen dos propiedades importantes y casi únicas. Primero, se absorben sobre sustratos cargados negativamente, como los sustratos biológicos o inertes (naturales); y segundo, muchos de ellos tienen propiedades bactericidas. Estas propiedades hacen que sean excelentes agentes antiestáticos, así como inhibidores de corrosión y puedan ser utilizados tanto en productos industriales como para uso doméstico. ⁽²⁹⁾

Los surfactantes catiónicos de cadena lineal más utilizados son las aminas grasas, sus sales y sus derivados cuaternarios. Si el átomo de nitrógeno posee cuatro enlaces se tiene un amonio y si estos cuatro enlaces son con átomos de carbono se tiene un amonio cuaternario. En el amonio, el átomo de nitrógeno cede dos electrones para

asegurar el cuarto enlace y queda cargado positivamente. Otro ejemplo importante de surfactantes catiónicos está conformado por los heterociclos aromáticos saturados que contienen uno o varios átomos de nitrógeno. ⁽²⁵⁾

Surfactantes anfotéricos

Los surfactantes llamados anfóteros o anfotéricos son aquellos que poseen dos grupos funcionales, uno aniónico y el otro catiónico. En la mayoría de los casos es el pH quien determina el carácter dominante, favoreciendo una u otra de las posibles disociaciones: aniónico a pH alcalino o catiónico a pH ácido. A pesar de esto, hay excepciones, ya que ciertos anfóteros son insensibles al pH. Cerca de su punto isoelectrico ellos son realmente anfotéricos, es decir, poseen dos cargas a la vez y presentan a menudo un mínimo de actividad superficial o interfacial.

Estos surfactantes son en general muy poco irritantes, además de ser compatibles con los demás tipos. En la mayoría de los casos, pueden utilizarse en fórmulas farmacéuticas o cosméticas. Los anfóteros son en general tan caros como los surfactantes catiónicos y por esta razón su utilización se reduce a aplicaciones particulares. ⁽²⁵⁾ Los surfactantes anfotéricos son generalmente compuestos de alta complejidad, entre ellos se pueden citar: los amonio ácidos propiónicos, los imido ácidos propiónicos, las n-alkil betainas, las sulfobetainas, las alkil taurinas y los alkil aromáticos. ⁽²⁹⁾

Surfactantes en Solución Acuosa

Los surfactantes poseen dos propiedades fundamentales : son capaces de ubicarse en una interfase según el fenómeno llamado adsorción, y también son capaces de asociarse para formar polímeros de agregación llamados micelas. Todas las propiedades de las soluciones que contienen surfactantes provienen de estas dos propiedades fundamentales. Por esto, los surfactantes son susceptibles de compatibilizar el agua con los aceites, permitiendo la formación de estructuras que

asocian agua y aceite “en una sola fase”, llamadas soluciones micelares u otras según el caso.

La adsorción es un fenómeno espontáneo impulsado por la disminución de energía libre del surfactante al ubicarse en la interfase y satisfacer parcial o totalmente su doble afinidad. Tal adsorción ocurre también cuando una sola afinidad está satisfecha , como en el caso de la adsorción en la superficie aire-agua o líquido-sólido. En tal caso el llamado efecto hidrófobo es la principal fuerza motriz, ya que re mueve el grupo apolar del agua. ⁽³⁰⁾

Cuando a una solución acuosa se le añade cada vez más surfactante, este comienza por adsorberse a las interfases disponibles, pero luego su concentración en forma mono-molecular aumenta hasta que se forman las primeras micelas. Este fenómeno es conocido como auto-asociación. ⁽²⁴⁾

La micela es un polímero de asociación en el cual el surfactante al canza una posición favorable y, por lo tanto, es una estructura energéticamente estable . En una micela los grupos hidrófilos están unidos por puentes de Hidrógeno al agua que los rodea, mientras que los grupos hidrófobos (o lipófilos) están protegidos en su interior, e interactúan con otros grupos del mismo tipo. En medio acuoso las micelas pueden agrupar varias decenas y aún algunos centenares de moléculas; la dimensión y la geometría de estos conglomerados dependen esencialmente de la estructura del surfactante y del ambiente físico-químico. A continuación, en la figura N° 9, se muestra como se asocian los grupos hidrófobos en una micela . ⁽³¹⁾

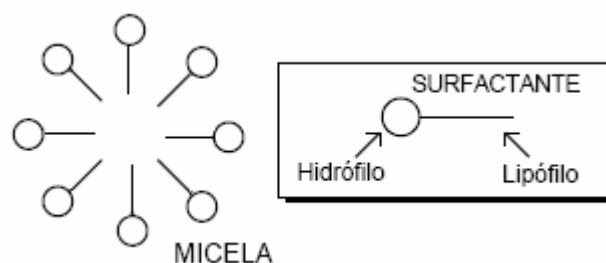


Figura N° 9: Micela. ⁽²⁴⁾

Solubilización micelar

Las soluciones micelares en medio acuoso poseen una propiedad muy importante llamada capacidad de solubilización. Esto se refiere a que pueden solubilizar sustancias apolares (como los aceites) o anfífilas en cantidades considerables dentro o en la superficie de las micelas. En casos extremos, se pueden producir soluciones micelares que contienen más aceite que agua. La figura N° 10 muestra la variación de la concentración de hidrocarburo solubilizado en una solución de surfactante en función de la concentración de este último. A partir de la concentración micelar crítica (CMC), la solubilización aumenta considerablemente, ya que el hidrocarburo penetra dentro de las micelas. ⁽³⁰⁾

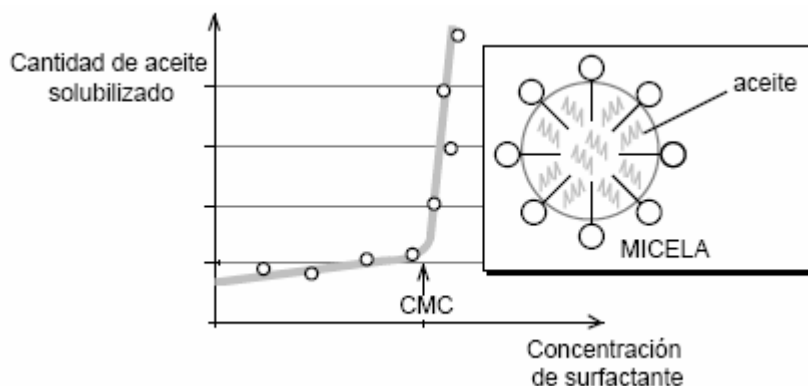


Figura N° 10: Solubilización micelar. ⁽²⁴⁾

La solubilización micelar puede producirse por diversos mecanismos, y permite “disolver” aceite en agua o viceversa, lo que es de gran interés para diversos tipos de

aplicaciones relacionadas con emulsificación. En ciertos casos la solubilización puede ser considerable, hasta el punto en que puedan presentarse micro-emulsiones.⁽²⁴⁾

El tipo de solubilización depende esencialmente de la naturaleza del aditivo que se agregue a la solución acuosa de surfactante. En el caso de compuestos no polares, tales como los hidrocarburos o los aceites, la solubilización se realiza en el interior lipofílico de las micelas. Por otra parte, los aditivos anfífilos (como por ejemplo los alcoholes) solubilizan a través de una co-micelización, es decir, formación de micelas mixtas conteniendo los dos anfífilos. El tercer tipo de solubilización corresponde a los aditivos insolubles a la vez en agua y en el interior lipofílico de las micelas, que parecieran adsorberse en la superficie de las mismas. Por último, se tiene la solubilización asociada a las micelas de surfactantes no iónicos, cuyo hidrófilo consiste en una o varias cadenas de poli-oxietileno o poli-oxipropileno; estas micelas son capaces de “secuestrar” ciertos compuestos orgánicos logrando algo similar a la solubilización.⁽³²⁾

Concentración micelar crítica

La concentración micelar crítica (CMC) es la concentración a partir de la cual las fuerzas que favorecen la formación de las micelas (efecto hidrófobo), dominan a las fuerzas que se oponen a esta (repulsión entre partes polares). Los efectos que favorecen la micelización producen un descenso de la CMC y viceversa. Se ha hablado sólo de micelas en medio acuoso, pero se puede considerar que los mismos fenómenos se producen en medios apolares de forma diferente.⁽³⁰⁾

La CMC no es en realidad un valor exacto, sino un cierto rango de concentración, que puede ser relativamente amplio si el surfactante es una mezcla de especies químicas notablemente diferentes entre sí. La concentración micelar crítica, que se refiere a la zona de aparición de las primeras micelas, puede detectarse mediante numerosos métodos, ya que diversas propiedades presentan en esta zona una discontinuidad en su variación. Los métodos más empleados se basan en la variación de la tensión

interfacial (todo tipo de surfactantes) y de la conductividad electrolítica de las soluciones (sólo surfactantes iónicos).⁽³²⁾

En lo que concierne a la concentración micelar crítica, conviene destacar cuatro propiedades fundamentales:⁽³²⁾

1. Por encima de la CMC, toda molécula adicional de surfactante se incorpora dentro de las micelas, y la concentración de surfactante en estado molecular no asociado (monomérico) es prácticamente constante; sin embargo, el equilibrio monómero-micela es de tipo dinámico, ya que existe un intercambio permanente de moléculas entre las micelas y la fase acuosa.
2. La dimensión de las micelas (10-100 Å) y el número de moléculas por micela (número de agregación) dependen del tipo de surfactante y del ambiente físico-químico (electrolitos, temperatura).
3. La tensión interfacial de un sistema que contiene un surfactante puro no varía cuando la concentración de este último sobrepasa su CMC; en otros términos, se puede decir que un exceso de micelas no cambia en nada la actividad interfacial. Sin embargo, la magnitud de los fenómenos de solubilización micelar varía con la cantidad de micelas.
4. Por debajo de la CMC, las propiedades termodinámicas de las soluciones de surfactante siguen leyes ideales o regulares, del mismo tipo de aquellas soluciones que contienen un soluto de gran dimensión molecular. Por el contrario, encima de la CMC se observa un comportamiento fuertemente no ideal y una actividad casi constante.

Factores que influyen la concentración micelar crítica

1. Competencia entre interacciones: Ya se mencionó que la minimización de las interacciones entre la parte lipofílica del surfactante y el agua corresponde al efecto hidrófobo que favorece la formación de micelas. Cuanto más importante la parte lipofílica del surfactante, más fuerte la tendencia a formar micelas y, por lo tanto, más baja la CMC. Por el contrario, cuanto más polar el grupo hidrofílico del surfactante, menor la tendencia a formar micelas y, por lo tanto, mayor la CMC.
2. Estructura del surfactante: La CMC de un surfactante depende a la vez de su grupo hidrofílico (tipo, tamaño, carga) y de su grupo lipofílico (longitud, ramificación). La CMC decrece cuando el número de átomos de carbono del grupo lipofílico del surfactante aumenta. Además, la ramificación de este grupo es un factor de primera importancia; en efecto se encontró que la CMC aumenta notablemente con la ramificación. En lo que se refiere al grupo hidrofílico se debe destacar que la CMC de los surfactantes no iónicos es en general mucho más baja (de 100 a 1000 veces menor) que aquella de los iónicos conteniendo un grupo lipofílico equivalente.
3. Ambiente fisicoquímico: La adición de electrolitos disminuye la solvatación de la parte hidrofílica del surfactante, así como también produce una mayor concentración de iones en la vecindad de la superficie de las micelas y, por lo tanto, resulta en un efecto de pantalla que reduce las repulsiones electrostáticas entre las partes hidrofílicas cargadas. Ambos tipos de efecto favorecen la formación de micelas, y de manera general se puede decir que la presencia de electrolitos tiende a disminuir la CMC. Para los surfactantes no iónicos u anfotéricos el efecto de los electrolitos es cualitativamente semejante, pero de magnitud notablemente menor.

4. Temperatura: Para surfactantes iónicos la CMC en solución acuosa primero decrece y luego vuelve a crecer con la variación de la temperatura. Para surfactantes no iónicos se observa un fenómeno semejante, con el mínimo cerca de 50°C. La existencia de este mínimo de CMC en función de la temperatura se debe esencialmente a dos efectos opuestos. De un lado, un aumento de temperatura produce una reducción de hidratación del grupo hidrofílico y, por lo tanto, tiende a favorecer la micelización (la CMC disminuye). Por otra parte, un aumento de temperatura produce una desorganización creciente de las moléculas de agua que se encuentran cerca del grupo no polar y, como consecuencia, la compatibilidad agua-grupo no polar aumenta, lo que desfavorece la formación de la micelas (la CMC aumenta).

Espesantes

Los espesantes y gelificantes alimentarios, a veces llamados gomas hidrosolubles o hidrocoloides, son macromoléculas que se disuelven o dispersan fácilmente en el agua para producir un aumento muy grande en la viscosidad y, en ciertos casos, un efecto gelificante, emulsificante o estabilizante. En general, los espesantes suelen conferir un comportamiento pseudo-plástico a las soluciones acuosas a las que son añadidos. Según su origen, se distinguen las gomas de origen vegetal, esencialmente de naturaleza glucídica y las gomas de origen animal cuya naturaleza es proteica.

Distintos alimentos tienen consistencias y texturas diferentes. No hay dos espesantes ni gelificantes exactamente iguales y, en general, cada uno será más eficaz en una aplicación concreta que otro. Sin embargo, una mezcla de espesantes suele ser más eficaz que cualquiera de ellos usado individualmente. Por otra parte, las condiciones de los procesos a que se someten los alimentos son muy variables, y cuando se utilizan espesantes o gelificantes para una aplicación determinada, es esencial el control riguroso de todas las condiciones asociadas a este procesamiento. Por

ejemplo, algunos productos requieren una gelificación en caliente, mientras que otros precisan gelificar en frío. ⁽⁸⁾

El interés en los hidrocoloides está basado en su comportamiento reológico, es decir, su viscosidad, su capacidad de formación de geles y sus efectos estabilizantes. Estas propiedades pueden obtenerse solo después de alcanzar la solubilización completa de las moléculas. Al solubilizarse, estas moléculas se reordenan de acuerdo con varios parámetros: su peso molecular, su espacio (tamaño y estructura), la presencia o no de grupos funcionales, la temperatura del medio y las interacciones con otros ingredientes.

Todos estos parámetros tienen un efecto diferente en cada tipo de espesante y pueden afectar significativamente la textura del producto final. Puede afirmarse que todos los hidrocoloides poseen la propiedad de aumentar considerablemente la viscosidad del medio acuoso para concentraciones bajas, aproximadamente del 1%. Este poder espesante varía mucho de una goma a otra, es muy elevada para la goma Xantan, las carrageninas y los derivados de la celulosa, pero está más limitado para las pectinas, la goma arábiga y los almidones.

En cuanto a las propiedades gelificantes de estas macromoléculas, se tiene que ellas pueden proporcionar al producto ciertas características que lo clasifiquen como un estado intermedio entre líquido y sólido, cuya organización molecular permite mantener su forma y resistir a ciertos estreñimientos. Por tanto, el gel es un sistema difásico constituido por una red macromolecular tridimensional sólida que retiene entre sus mallas una fase líquida. En efecto, antes de la gelificación, las moléculas del polímero forman una verdadera solución; la formación del gel implica, por consiguiente, la asociación de cadenas entre sí o de segmentos de cadenas entre ellas, mediante uniones débiles como los puentes de hidrógeno o las uniones de coordinación. ⁽³³⁾

Espesantes Utilizados en la Producción de Aderezos para Ensaladas

Entre los espesantes y/o gelificantes más utilizados en la industria de alimentos se encuentran: los alginatos, las pectinas, las carrageninas, el agar, la goma Xantan, la goma Guar y la gelatina. En lo siguiente, se presenta una breve descripción de aquellos espesantes y gelificantes utilizados comúnmente en la producción de aderezos para ensaladas.

Goma Xantan ⁽³⁴⁾

La goma Xantan es un producto relativamente reciente, utilizado solo desde 1969. Es un hetero-polisacárido ramificado que se produce por fermentación del azúcar, que puede obtenerse previamente a partir del almidón de maíz, por la bacteria *Xanthomonas campestris*. Está constituida por una cadena lineal de b-D glucosa, que lleva en su mitad una ramificación lateral con dos residuos de glucosa, y su peso molecular es superior a un millón.

La goma Xantan no es capaz por sí misma de formar geles, pero sí de conferir a los alimentos a los que se añade una gran viscosidad, empleando concentraciones relativamente bajas. Además, es estable en un amplio rango de acidez, es soluble en frío y en caliente y resiste muy bien los procesos de congelación y descongelación. Se utiliza en emulsiones, como por ejemplo los aderezos para ensalada, también en helados y para estabilizar la espuma de la cerveza. Mezclada con otros polisacáridos, especialmente con la goma de algarrobo, es capaz de formar geles, utilizándose en dulces y otros productos. Es muy utilizada para dar consistencia a los productos bajos en calorías empleados en dietética.

Carrageninas

Las carrageninas o carragenatos son polímeros sulfatados de unidades de galactosa, que se extraen de algas rojas de la familia Rhodophyceae. Sus pesos moleculares varían entre 500.000 (forma natural del alga) y 100.000, que es la carragenina comercial más usada en la elaboración de alimentos. Según el grado de sulfatación y

la posición de los carbonos sustituidos por los ésteres sulfatos, se distinguen diferentes fracciones cuyas principales son la kappa (k), la iota (i) y la lambda (l) carragenina. Cada especie está caracterizada por una composición diferente en sus diversas fracciones, y las carrageninas comerciales son mezclas más o menos enriquecidas de una u otra de estas tres fracciones.⁽³³⁾

Los carragenatos, a partir de una concentración del 0,025%, estabilizan suspensiones y a partir del 0,15% proporcionan ya texturas sólidas. Al dispersarse en agua se hinchan y requieren de un ligero calentamiento para que se disuelva; la solución resultante presenta una viscosidad baja a temperaturas superiores a 60° C, pero al enfriarse establece un gel térmicamente reversible, cuya calidad y rigidez dependen de la concentración del polímero y de la cantidad de iones que contengan.

El mecanismo de gelificación no se conoce totalmente, sin embargo, se ha visto que las moléculas de carragenina desarrollan estructuras helicoidales que a veces reaccionan entre sí creando un red tridimensional. A temperaturas mayores que las del punto de fusión del gel, se produce una agitación térmica que impide que se formen las hélices. Posteriormente cuando se enfría, se induce a una transición de solución a gel, que origina que se forme una cadena de los polímeros. Al seguir enfriándose se favorece la agregación de las moléculas, y el establecimiento final del gel, cuya rigidez depende de la rapidez con la que estas transiciones ocurren.

Goma Tara

La goma Tara se obtiene del endosperma de la semilla del árbol tara (*Cisalpina espinosa*). Igual que la goma Guar y la goma de Algarrobo, consiste mayoritariamente en polisacáridos de elevado peso molecular, sobre todo galactomananos, los cuales están formados por una cadena de manosas con ramificaciones formadas por unidades de galactosa. La goma Tara contiene aproximadamente un 25% de galactosa, mientras que la goma Guar tiene aproximadamente 34% y la goma de Algarrobo alrededor de 20%.

La goma Tara es particularmente soluble en agua fría y como el resto de las gomas de su familia, tiene un comportamiento pseudo-plástico. Produce un efecto gelificante cuando se utiliza junto con la goma Xantan, así como también aumenta las propiedades gelificantes del agar y de la carragenina. ⁽³⁵⁾

Es usada principalmente para espesar soluciones acuosas y para controlar la movilidad de materiales dispersados o disueltos. Esta goma posee las características propias de las gomas vegetales, actuando como espesante, aglomerante, estabilizador, coloide y capa protectora. Posee la ventaja de ser incolora, insípida, muy estable y altamente resistente a la descomposición. ⁽³⁶⁾

Sinergia entre Espesantes ⁽³³⁾

Aunque en la composición final de la mezcla, los espesantes se incorporan en cantidades mínimas con respecto a los demás ingredientes, su papel es determinante para lograr la consistencia, textura y el aspecto adecuado para obtener un excelente producto. En muchos casos, la selección de una combinación de varios espesantes es la mejor opción, ya que permite disminuir la cantidad total de aditivos necesaria para lograr las características deseadas. Una mezcla de dos macromoléculas (gelificantes o no) puede, en ciertos casos, presentar fenómenos de sinergia que conduzcan a diferentes comportamientos reológicos y a gelificaciones, en el caso de que uno de los dos componentes sea capaz de gelificar. A continuación, se presentan dos casos de sinergia entre aditivos espesantes:

1. Sinergia de las carrageninas con los galactomananos: La existencia de interacciones entre estos espesantes se ha aprovechado en beneficio industrial. Los geles obtenidos tienen las características reológicas netamente modificadas por la presencia de algún galactomanano, como la goma Tara; es posible obtener un gel con una mezcla k-carragenina-galactomanano a una concentración inferior a la que las carrageninas gelifican solas. La naturaleza de las interacciones que se establecen entre estos espesantes se explica por la

existencia de zonas exentas de galactosa a lo largo de la cadena manano. Estas zonas “lisas” pueden asociarse, gracias a los enlaces hidrógeno, a las dobles hélices de las carrageninas.

2. Sinergia entre la goma Xantan y los galactomananos: La goma Xantan no gelifica por si misma, en efecto, no posee más que grandes propiedades espesantes. Pero una mezcla de estos dos aditivos produce por calefacción y enfriamiento, un gel muy elástico. El mecanismo propuesto se basa en una transición de la conformación de la Xantan, que le permite asociarse con las zonas “lisas” de los galactomananos, de igual forma que en el caso anterior. El mismo esquema permite explicar la sinergia entre la goma Xantan y la goma Tara. En este caso, no se produce gelificación pero se comprueba un aumento muy marcado de la viscosidad.

Análisis Dimensional y Similitud

En la mayoría de los problemas de interés en el campo de la mecánica de fluidos es necesario recurrir a métodos experimentales para establecer relaciones entre las variables involucradas. En los trabajos experimentales, es común tener que realizar pruebas con objetos y equipos de grandes dimensiones, demasiado grandes para que puedan llevarse a cabo a un costo razonable, por lo que es necesario reducir al máximo la experimentación requerida. Tales investigaciones suelen realizarse en laboratorios, empleando modelos más pequeños que el dispositivo real (prototipo); esto permite reducir significativamente los costos respecto a la experimentación en escala natural, así como también permite estudiar diversas configuraciones o condiciones de flujo. ⁽³⁷⁾

En la mecánica de fluidos, las ecuaciones deducidas analíticamente son válidas para cualquier sistema de unidades y, en consecuencia, cada grupo de términos en la

ecuación debe tener la misma representación dimensional; esto se conoce como ley de homogeneidad dimensional. Una aplicación muy importante de esta ley se presenta en situaciones donde las variables que intervienen en un fenómeno físico se conocen, mientras que la relación entre ellas se desconoce. Mediante un procedimiento conocido como análisis dimensional, el fenómeno puede formularse como una relación entre un conjunto de grupos adimensionales de las variables, siendo el número de grupos menor al de variables. La ventaja de este método radica en que se requiere una experimentación mucho menor para establecer la relación entre las variables en un rango dado. ⁽³⁸⁾

Existen parámetros o grupos adimensionales comunes que aparecen en numerosas situaciones asociadas a fluidos, debido a que relacionan las diferentes fuerzas que pudieran afectar un campo de flujo. Por esto, algunos de ellos han sido identificados de la siguiente forma:

Número de Reynolds (Re)	$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu}$	Relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas.	(4)
-------------------------	---	---	-----

Número de Euler (Eu)	$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot V^2}$	Relación entre las fuerzas de presión y las fuerzas inerciales.	(5)
----------------------	--	---	-----

Número de Froude (Fr)	$Fr = \frac{V^2}{L \cdot g}$	Relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de gravedad.	(6)
-----------------------	------------------------------	--	-----

Número de Weber (We)	$We = \frac{\rho \cdot V^2 \cdot L}{\sigma}$	Relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de tensión superficial.	(7)
----------------------	--	---	-----

Donde: ρ es la densidad del fluido, V es la velocidad característica, L es la longitud característica, μ es la viscosidad del fluido, Δp es la caída de presión, g es la aceleración de la gravedad y σ es la tensión superficial.

Al analizar los números adimensionales comunes como los cocientes de las fuerzas involucradas, puede anticiparse cuales de ellos serán significativos para una

aplicación en particular. Por ejemplo, si las fuerzas viscosas son importantes, el número de Reynolds será un parámetro adimensional significativo a la hora de estudiar dicha aplicación. Obviamente, no todos los efectos incluidos en los parámetros anteriormente descritos serán de interés en una determinada situación. Además, es posible que haya más de una longitud característica importante, por lo que sería necesario introducir otras relaciones adimensionales geométricas .⁽³⁷⁾

Los números adimensionales permiten aplicar los resultados de ciertas experiencias a otros casos con diferentes medidas físicas , y a fluidos con propiedades diversas. Estos parámetros son muy importantes en lo que se conoce como similitud, que es el estudio a partir del cual se predicen las condiciones de un prototipo (escala natural) mediante observaciones realizadas durante la experimentación con modelos (de menor escala generalmente).

La similitud de los fenómenos de flujo puede existir siempre que se satisfagan ciertas leyes: la similitud geométrica, que exige que el modelo y el prototipo tengan la misma forma; la similitud cinemática, que se presenta cuando el patrón de las líneas de flujo, las relaciones entre las velocidades y las aceleraciones correspondientes son las mismas para el modelo y el prototipo, excepto por un factor de escala ; y finalmente la similitud dinámica, si las fuerzas que actúan sobre masas correspondientes en el flujo modelo y el flujo prototipo mantienen la misma proporción en todos los puntos del campo de flujo .

Los conceptos de semejanza dinámica combinados con la cuidadosa selección y uso de los parámetros adimensionales, hacen posible la generalización de datos experimentales. Como consecuencia, se puede estudiar un fenómeno determinado y la influencia de todas las variables para una cierta aplicación , así como también es posible minimizar el número de experiencias necesarias.⁽¹²⁾

Mezclado

El mezclado de fluidos es una operación necesaria en muchos procesos industriales, y de gran importancia en la industria alimenticia. Es importante destacar la diferencia entre los conceptos de mezclado y agitación, ya que la mezcla es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas, mientras que la agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una forma específica, generalmente con un modelo circulatorio dentro de algún tipo de contenedor.

La agitación de líquidos en un proceso determinado se realiza con diversos fines, dependiendo de los objetivos de la etapa del proceso. Esto comprende: la suspensión de partículas sólidas, el mezclado de líquidos miscibles, la dispersión de un gas (en un líquido), la dispersión de un líquido inmiscible (en el seno de otro líquido), la promoción de transferencia de calor, entre otros.⁽³⁹⁾

En todos los casos, las dimensiones del tanque y de los impulsores (agitadores o rodetes), así como también la presencia de deflectores y otros internos, son factores que influyen la cantidad de energía requerida para alcanzar la agitación y calidad de mezclado necesarios. A continuación, se presentan algunos lineamientos básicos para el diseño y/o selección adecuada de un tanque agitado:⁽⁴⁰⁾

1. El tanque: Generalmente cilíndrico y provisto de un eje vertical. Se recomienda utilizar uno cuyo fondo sea redondeado y no plano, con el fin de eliminar rincones donde sea difícil que penetren las corrientes de fluido. En cuanto a las proporciones del tanque, varían dependiendo de la aplicación; generalmente, cuando se utiliza un solo impulsor, se recomienda que el nivel de líquido sea aproximadamente igual al diámetro del tanque.

2. Deflectores: Su uso no es estrictamente necesario, en algunos casos se recomienda el uso de estos internos para evitar la formación de vórtice y la rotación del líquido como un todo dentro del tanque.
3. Impulsores: En cuanto al tipo de impulsor, se tiene la clasificación básica de aquellos que propician el flujo axial (paralelo al eje) y los que general flujo radial (dirección tangencial). Más específicamente, se tienen impulsores de hélice, palas, turbina, estator-rotor, entre muchas otras variantes y subtipos; cada uno de los cuales genera un patrón de flujo determinado. En cuanto a las dimensiones del impulsor, se tiene que estas dependen del tipo utilizado y de las condiciones de operación específicas (fluidos involucrados, dimensiones del tanque, etc.).
4. Velocidad de agitación: Este parámetro depende estrictamente del objetivo que se pretende alcanzar y de los fluidos involucrados; sin embargo, suelen implementarse velocidades de agitación estándares, dadas por la utilización de motores comerciales, que pueden estar acoplados a un reductor de velocidad. Junto con el diámetro del impulsor, la velocidad de agitación (rotación del eje) determina la llamada velocidad periférica que, como su nombre lo indica, se refiere a la velocidad a la que se mueve la periferia del impulsor; éste parámetro es el que realmente determina la mezcla de los fluidos sometidos a la agitación.
5. Ubicación del impulsor: Generalmente el eje se coloca de forma vertical y centrado en el tanque. Sin embargo, puede resultar satisfactorio colocar el eje de forma inclinada u horizontal. En cuanto a la altura del impulsor, se recomienda colocarlo cercano al fondo; para una primera aproximación $1/6$ de la altura del líquido se considera adecuada.

Para que el mezclado en un tanque de proceso sea eficaz, el volumen de fluido movido por el agitador debe ser suficiente para llevar las corrientes hasta las partes

más remotas del tanque. En las operaciones de mezcla y dispersión, la velocidad de circulación no es el único factor importante, siendo la turbulencia de la corriente un factor que con frecuencia controla la eficacia de la operación. La turbulencia es una consecuencia de que las corrientes estén adecuadamente dirigidas y de que se generen grandes gradientes de velocidad en el líquido.

Aún cuando la velocidad de flujo y la disipación de potencia aumentan a mayor velocidad de agitación, la selección del tipo y tamaño del impulsor influye sobre sus valores relativos. En general, se utilizan grandes agitadores que se mueven a velocidades medias cuando se busca promover el flujo; y agitadores más pequeños a velocidad elevada cuando se requiere una alta turbulencia interna. ⁽³⁹⁾

Modelos de Flujo en Tanques Agitados ⁽³⁹⁾

El tipo de flujo que se produce en un tanque agitado depende del tipo de impulsor, de las características del fluido y del tamaño y proporciones del tanque y del impulsor. La velocidad del fluido en un punto del tanque tiene tres componentes: radial, longitudinal y tangencial; el tipo de flujo global dentro del mismo dependerá de las variaciones en estas tres componentes de la velocidad de un punto a otro. Para el caso más común, en el cual se tiene un eje vertical, las componentes radial y tangencial están en un plano horizontal, mientras que la componente longitudinal es vertical.

Las componentes radial y longitudinal de la velocidad del fluido en un punto dado, son útiles porque dan lugar al flujo necesario para que se produzca la mezcla. Cuando el eje es vertical y está centrado en el tanque, la componente tangencial de la velocidad suele ser perjudicial para la mezcla, ya que sigue una trayectoria circular alrededor del eje, crea un vórtice en la superficie del líquido y da lugar a una estratificación permanente de sustancias sin mezclar en diferentes niveles, es decir, sin que exista flujo longitudinal de un nivel a otro.

En el flujo circulatorio, el líquido fluye según la dirección de movimiento del impulsor y, por consiguiente, disminuye la velocidad relativa que existe entre el agitador y el líquido, con lo cual se limita la potencia que puede ser absorbida por él. En un tanque donde no se hayan colocado deflectores, el flujo circulatorio es inducido por todos los tipos de impulsores, sean de flujo axial o radial. En efecto, si los remolinos producidos por la agitación son intensos, el tipo de flujo puede llegar a ser el mismo para cualquier tipo de impulsor.

Para velocidades de agitación elevadas, la profundidad del vórtice que se forma puede llegar a ser tan grande que llegue al impulsor mismo, dando lugar a que en el líquido se introduzca el gas que está encima de él (aire generalmente), lo cual suele representar un inconveniente y debe evitarse.

El flujo circulatorio y los remolinos pueden evitarse por diferentes métodos, uno de ellos es colocar el eje de agitación cerca de las paredes del tanque o de forma inclinada. Otro método, que generalmente se aplica en los tanques de gran tamaño con eje de agitación centrado, consiste en instalar placas deflectoras, que impiden el flujo circulatorio sin afectar el flujo radial y longitudinal. Estos deflectores pueden tener diversos diseños, los más comunes consisten en placas verticales, perpendiculares a la pared del tanque, cuyo ancho suele estar alrededor de una décima parte del diámetro del tanque. Excepto en tanques demasiado grandes, cuatro placas deflectoras de este tipo suelen ser suficientes para evitar los remolinos y la formación de vórtice.

Una vez que el flujo circulatorio es evitado, el modelo específico de flujo en el tanque depende del tipo de impulsor. Los agitadores de hélice generalmente dirigen el líquido hacia el fondo del tanque, donde la corriente se esparce radialmente en todas las direcciones hacia la pared, asciende a lo largo de la misma y retorna desde la parte superior hasta el punto de succión del impulsor. Por otra parte, los agitadores de palas y las turbinas de placas planas producen un buen flujo radial en el plano del impulsor,

dividiendo el flujo hacia la pared para formar dos modelos distintos de circulación, una parte fluye hacia abajo a lo largo de la pared y retorna hacia el centro del impulsor, mientras que otra asciende hacia la superficie y retorna al impulsor desde la parte superior.

Mezcla de Líquidos Inmiscibles

En el proceso de formación de emulsiones O/W, tales como los aderezos para ensaladas, un líquido de naturaleza oleica es dispersado en agua, la cual es insoluble con el primero. Esta dispersión puede lograrse utilizando diferentes tipos de equipo: tanques agitados, dispersores de tubería, molinos coloidales, entre otros; siendo en general aparatos que generan esfuerzos cortantes muy elevados.

En el caso de los tanques agitados, el tamaño de las gotas formadas es función de la potencia por unidad de volumen, de la velocidad periférica, entre otras variables. La viscosidad de los fluidos es un factor importante en este sentido, ya que es difícil dispersar un líquido viscoso en una fase continua de baja viscosidad; en esta situación la gota viscosa resiste la deformación.⁽³⁹⁾

El estudio del protocolo de mezcla de una emulsión se basa en la investigación de cómo influyen las variables de mezclado sobre las características de la emulsión formada, siendo la distribución de tamaño de gota la más importante. Estas variables son: energía (potencia) de mezclado, tipo de impulsor, ubicación del agitador, régimen de flujo y tiempo de mezclado. Las emulsiones son producidas principalmente por la fuerza de cizallamiento del impulsor, allí radica la importancia de la adecuada selección del mismo. Generalmente, la relación que debe guardar el diámetro del impulsor respecto al diámetro del tanque de mezclado es de 1/3.

Cuando se tienen las dos fases inmiscibles en el tanque de mezclado antes de iniciar la formación de la emulsión, generalmente la fase acuosa estará ubicada en el fondo del tanque y la fase orgánica en el tope. La altura del impulsor al inicio de la

agitación, es un factor determinante en el tipo de emulsión formada. En la mayoría de los casos, si se ubica el impulsor en la fase acuosa (en el fondo), se obtiene una emulsión O/W, en cambio, si se éste se ubica en la fase orgánica (en el tope) la emulsión formada será del tipo W/O. Esto indica que la fase continua de la emulsión será aquella en la cual el impulsor se encuentre “sumergido” durante la primera etapa del proceso de agitación, siempre y cuando la relación aceite /agua, el tipo de surfactante y otras condiciones lo permitan.

El régimen de flujo es una variable del protocolo de mezcla bastante compleja de determinar, generalmente por simplicidad, se asume que el flujo predominante es el tangencial, donde existe una zona de vórtice alto en un rango cercano al 70% del diámetro del impulsor y una zona casi libre de vórtice en la parte externa del mismo. Con el incremento en la viscosidad de los líquidos agitados, el radio del vórtice se reduce y finalmente tiende a cero en la transición de la viscosidad del rango turbulento al laminar. Dicha transición tiene mucho que ver con las características de potencia, descarga de fluido o fluido desplazado por el impulsor y tiempo de mezclado.

Para un rango de Reynolds menor que 10, el fluido alrededor del impulsor se mueve con la rotación del impulsor y el fluido que se encuentra distante del impulsor casi no tiene movimiento. Así la estabilidad de la mezcla es muy baja y el tiempo de mezclado sería extremadamente largo. En esta región, el flujo del líquido es laminar y la resistencia a la rotación del impulsor está dominada por la resistencia viscosa. El efecto centrífugo debido a la rotación del impulsor es poco efectivo y el desplazamiento del fluido por el impulsor es débil.

Cuando el número de Reynolds se incrementa severamente alrededor de un valor de 100, el flujo que rodea al impulsor comienza a ser turbulento, así las zonas estancadas que no tenían movimiento desaparecen. Este punto es un rango de transición donde flujos laminar y turbulento coexisten. En esta región, el líquido que se encuentra

alejado del impulsor es laminar y la velocidad rotacional es pequeña. La diferencia de velocidad entre el líquido y el impulsor es tan amplia que el efecto centrífugo es predominante.

En el rango donde el número de Reynolds está por encima de 100, el flujo tangencial es predominante y una débil circulación secundaria del flujo se sobrepone al de un tanque sin baffles. El radio de la zona de alto vórtice es muy importante, es función de la relación del diámetro del impulsor con respecto al del tanque y del número de Reynolds.

La potencia consumida por el impulsor es una función de su velocidad, diámetro y diseño, así como también de una serie de factores que incluyen: propiedades físicas de los fluidos, tamaño del tanque y geometría, ubicación relativa del impulsor, presencia o ausencia de baffles, diseño y posición de los mismos. En cuanto a la posición del impulsor, se tiene que es un factor determinante de la potencia consumida, ya que si el impulsor se coloca cerca del fondo del tanque, el requerimiento de potencia aumenta considerablemente, debido a que la cercanía del fondo perturba al fluido. Se ha tratado de reportar, en términos de potencia del impulsor, una cantidad adimensional llamada número de Potencia (N_p), la cual permite realizar comparaciones entre diversos sistemas de mezclado .⁽⁴¹⁾

$$N_p = \frac{P}{V_A^3 \cdot D_i^5 \cdot \rho} \quad (8)$$

Donde: P es la potencia, V_A es la velocidad de agitación, D_i es el diámetro del impulsor y ρ es la densidad del fluido.⁽³⁹⁾

El número de Potencia puede expresarse en función del número de Reynolds y el número de Froude; pero en presencia de deflectores, al no producirse vórtice, el

número de Potencia sólo depende del número de Reynolds. Además, cuando el número de Reynolds es alto, alrededor de 100, el número de Potencia es esencialmente constante. En este caso, como el régimen es turbulento, la viscosidad no tiene efectos sobre la potencia. En cambio, a medida que el régimen de flujo se hace laminar, el efecto de la viscosidad sobre la potencia consumida tiene un incremento significativo; en este caso, el número de Potencia varía de forma inversamente proporcional al número de Reynolds. ⁽⁴¹⁾

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la metodología seguida en la realización de este Trabajo Especial de Grado (TEG), así como también el procedimiento utilizado en la empresa Orinoquia para la manufactura de la vinagreta ligera de parchita (ver anexo N° 1). En cuanto a la metodología asociada al TEG, ésta se presenta en dos partes: la metodología general, donde a grandes rasgos se explican todas las etapas del estudio ; y el plan de experiencias, donde se describe de forma detallada la metodología seguida en la parte experimental de este trabajo.

Procedimiento de Elaboración de la Vinagreta Ligera de Parchita de la Empresa Orinoquia

El proceso de manufactura de la vinagreta ligera de parchita se realiza bajo el esquema de proceso en lote (*batch*) y se divide en dos etapas generales. En la primera etapa, se forma una emulsión concentrada de alto contenido de fase interna (aceite) con la finalidad de favorecer la formación de gotas de bajo diámetro, lo que posteriormente conferirá una mayor estabilidad a la emulsión final. En la segunda etapa, llamada dilución, se incorpora el resto de los ingredientes hasta completar la formulación de la vinagreta; éstos pasan a formar parte de la fase continua o externa de la emulsión, junto con el agua inicialmente incluida en la emulsión concentrada. De esta forma, se logra obtener una emulsión final con un contenido de aceite del 7% , a partir de la emulsión concentrada (alto contenido de aceite), siendo la emulsión final el producto terminado (vinagreta).

A continuación se presentan los ingredientes y equipos utilizados, así como también la secuencia de pasos seguida por la empresa para la elaboración de la vinagreta ligera de parchita.

1. Preparación de la emulsión concentrada: (ver anexo N° 2)
 - 1.1. Se disuelve el surfactante no iónico en agua caliente.
 - 1.2. Se introduce todo el aceite de la formulación en el recipiente donde se va a formar la emulsión.
 - 1.3. Se incorpora el agua que contiene el surfactante disuelto, de modo tal que llegue directamente al fondo del recipiente, minimizando que durante esta etapa ocurra una premezcla entre el aceite y la solución agua/surfactante.
 - 1.4. Se introduce el mezclador hasta el fondo de este recipiente y se deja reposar por 5 minutos.
 - 1.5. Se enciende el mezclador y se agita el contenido del recipiente durante 15 minutos.
2. Etapa de dilución: (ver anexo N° 3)
 - 2.1. En un tanque con agitación y calentamiento, se realiza el tratamiento térmico a la pulpa de parchita y a la mostaza, con el fin de eliminar los microorganismos presentes en los insumos.
 - 2.2. Se van incorporando al recipiente de mezclado todos los ingredientes: pulpa de parchita y mostaza, vinagre, sal, aditivos conservantes y edulcorantes.
 - 2.3. Se agita hasta lograr la total homogenización de la mezcla.
 - 2.4. Se incorpora la emulsión concentrada.
 - 2.5. Se agregan los aditivos espesantes.
 - 2.6. Se continúa agitando por 45 minutos.
 - 2.7. Se envasa y etiqueta el producto.

Metodología General

En primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica de los temas de interés, de acuerdo con los objetivos propuestos; esto comprende los temas asociados a

emulsiones alimenticias, aditivos alimentarios (espesantes), uso de surfactantes y sus propiedades, mezclado de sustancias inmiscibles, y análisis dimensional aplicado a escalamiento.

Luego, se realizó una inducción a las técnicas experimentales de laboratorio para la medición de propiedades de las emulsiones, como lo son la distribución de tamaño de gota y la viscosidad. La medición de estas propiedades permitió analizar el efecto de diversos parámetros de formulación, composición y mezclado, sobre las características finales de la emulsión.

Esta etapa de inducción, también abarcó la participación dentro de la empresa en el proceso de elaboración de la vinagreta ligera de parchita, donde se conocieron todos los ingredientes utilizados y las diferentes etapas del proceso. Durante estas experiencias, se tomaron muestras de emulsión en diferentes etapas de la elaboración, y una muestra final del producto terminado. Así mismo, se detalló el procedimiento de elaboración, teniendo en cuenta la metodología utilizada por la empresa.

Una vez realizada la inducción, se procedió al desarrollo de la parte experimental. Con la finalidad de determinar la concentración óptima, se realizó un barrido de concentración de surfactante para el sistema que contiene únicamente agua, aceite y surfactante; siendo de tipo no iónico el utilizado en este caso. Además, se realizaron barridos de concentración de mostaza y yema de huevo (por separado), con la finalidad de determinar sus propiedades emulsificantes y evaluar su posible uso en la manufactura de la vinagreta ligera de parchita. En todos los casos se midió la distribución de tamaño de gota de la emulsión, para poder evaluar y comparar las propiedades emulsificantes de cada uno de los surfactantes empleados.

Para determinar la relación aceite/agua óptima en la formación de la emulsión concentrada, se realizó un barrido de relación volumétrica de fases, para una concentración de surfactante fija. De igual forma, se midió la distribución de tamaño

de gota de cada una de las muestras, las cuales eran sistemas compuestos únicamente por agua, aceite y surfactante.

Para realizar el estudio del efecto de la concentración y tipo de polímero (espesante) en las características de la emulsión final (vinagreta lista), se llevaron a cabo varias pruebas. En ellas, se emplearon diferentes concentraciones de cada uno de los espesantes a evaluar, siendo estos: goma Xantan, Carragenato y goma Tara ; el desempeño de los espesantes se evaluó de forma individual y en ciertas combinaciones específicas (según el caso). Todo esto fue realizado de acuerdo con los criterios y métodos recomendados por los fabricantes de estos aditivos y según la experiencia de la empresa en su utilización. En este caso, fue medida la viscosidad de las muestras preparadas, con la finalidad de determinar la concentración y tipo(s) de espesante(s) más adecuado.

Por otra parte, se evaluó la estabilidad estática en el tiempo para dos producciones comerciales de la vinagreta ligera de parchita. Para esto, se evaluaron mensualmente la distribución de tamaño de gota y la viscosidad, durante un período de seis meses.

En lo que se refiere al sistema de mezclado empleado para la formación de la emulsión, se evaluaron diferentes velocidades y tiempos de agitación; así como diferentes configuraciones geométricas (dimensiones del recipiente y altura de líquido), todo esto con la finalidad de determinar el efecto de cada una de estas variables sobre las características finales de la emulsión, principalmente sobre la distribución de tamaño de gota.

Una vez concluida la parte experimental, se reunió todo el material bibliográfico, los resultados y su análisis, para la redacción del Trabajo Especial de Grado (TEG); el cual se presentó en dos partes: TEG I, donde se indicaron los fundamentos teóricos y la metodología a seguir, y TEG II, donde se resume lo anterior y se muestran los resultados y conclusiones del estudio experimental.

Plan de Experiencias

A continuación se presentan los procedimientos y métodos asociados a la parte experimental de este estudio, realizados para cumplir con los objetivos propuestos.

Inducción a la Planta

La primera parte del estudio experimental fue realizada en la empresa Orinoquia, donde se participó en el procedimiento de manufactura de la vinagreta ligera de parchita, de forma tal de conocer los ingredientes, equipos y métodos asociados al proceso. Esto se realizó en dos oportunidades, es decir, en dos diferentes producciones de la empresa. En ellas, se tomaron las primeras muestras de emulsión, a diferentes tiempos durante su elaboración, con la finalidad de determinar cómo varía la distribución de tamaño de gota durante el tiempo de agitación en el proceso.

Las muestras tomadas en cada una de las producciones se presentan a continuación en la tabla N° 1.

Tabla N° 1: Muestras tomadas en la etapa de inducción a la planta.

	Etapa de la elaboración (minutos de agitación)	
	Concentrada	Dilución
Producción N° 1	2, 5, 10 y 15	0, 2, 5, 10, 20, 30 y 40, vinagreta lista
Producción N° 2	1, 2, 5, 10, 15 y 20	0, 2, 5, 10, 20, 30 y 40, vinagreta lista

Se realizó la medición de la distribución de diámetro de gota de cada una de las muestras, utilizando el equipo Malvern Mastersizer 2000, el cual es un analizador de tamaño por difracción de luz láser. Esto se repitió tres veces para cada una de las muestras y, en los casos donde hubo dispersión en los resultados, se realizaron mediciones adicionales. Este equipo reporta los resultados de distribución de tamaño de gota en forma de tablas y de forma gráfica, así como también reporta el valor del diámetro de gota promedio, entre muchos otros parámetros (ver anexos N° 4 y N° 5).

Pruebas Tipo I: Barridos de Concentración de Agentes Surfactantes

En estas experiencias se evaluaron las propiedades emulsificantes, a diferentes concentraciones, para tres compuestos diferentes: el surfactante no iónico comercial utilizado actualmente por la empresa, la mostaza y la yema de huevo; todo esto con la finalidad de analizar y optimizar su utilización en el proceso de manufactura de la vinagreta ligera de parchita. Con la realización de estas experiencias, se determinó el comportamiento de la distribución de tamaño de gota, en función de la cantidad y tipo de agente surfactante utilizado. Los barridos de concentración de agentes surfactantes, se realizaron para sistemas agua-aceite-surfactante, utilizando una relación aceite/agua fija. A continuación en las tablas N° 2, N° 3 y N° 4, se muestran las concentraciones seleccionadas y las cantidades utilizadas durante la realización de esta prueba.

Tabla N° 2: Cantidades de aceite, agua y surfactante comercial utilizadas en el barrido de concentración de surfactante.

	Concentración de Surfactante comercial (no iónico) [Concentraciones expresadas en base aceite]									
	10.000 ppm		8.000 ppm		6.000 ppm		4.000 ppm		2.000 ppm	
	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%
Aceite	476,2	79,4	477,0	79,5	477,7	79,6	478,5	79,7	479,2	79,8
Agua	119,0	19,8	119,2	19,9	119,4	19,9	119,6	19,9	119,8	20,0
Surfactante	4,8	0,8	3,8	0,6	2,9	0,5	1,9	0,3	1,0	0,2
Total	600,0	100,0	600,0	100,0	600,0	100,0	600,0	100,0	600,0	100,0

Tabla N° 3: Cantidades de aceite, agua y mostaza utilizadas en el barrido de concentración de mostaza.

	Concentración de Mostaza [Concentraciones expresadas en base aceite]							
	10%		8%		4%		2%	
	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%
Aceite	444,4	74,1	451,1	75,2	465,1	77,5	472,4	78,7
Agua	111,1	18,5	112,8	18,8	116,3	19,4	118,1	19,7
Mostaza	44,5	7,4	36,1	6,0	18,6	3,1	9,5	1,6
Total	600,0	100,0	600,0	100,0	600,0	100,0	600,0	100,0

Tabla N° 4: Cantidades de aceite, agua y yema de huevo utilizadas en el barrido de concentración de yema de huevo.

	Concentración de Yema de huevo [Concentraciones expresadas en base aceite]									
	20.000 ppm		15.000 ppm		10.000 ppm		8.000 ppm		4.000 ppm	
	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%
Aceite	472,4	78,7	474,3	79,0	476,2	79,4	477,0	79,5	478,5	79,7
Agua	118,1	19,7	118,6	19,8	119,0	19,8	119,2	19,9	119,6	20,0
Yema de huevo	9,5	1,6	7,1	1,2	4,8	0,8	3,8	0,6	1,9	0,3
Total	600,0	100,0	600,0	100,0	600,0	100,0	600,0	100,0	600,0	100,0

El procedimiento de preparación de las muestras fue similar en todos los casos, siendo la única diferencia el agente surfactante utilizado; consistió en lo siguiente:

1. En la balanza analítica se pesa la cantidad de surfactante a utilizar, directamente en el recipiente donde se realizará la agitación .
2. Se agrega el agua caliente, aproximadamente a 60° C, hasta que la balanza indique la cantidad requerida.
3. Con un agitador de vidrio, se dispersa el agente surfactante en el agua, removiendo por aproximadamente 1 minuto.
4. Se agrega poco a poco la cantidad de aceite requerida y se deja reposar por 3 minutos; esto con la finalidad de evitar la mezcla del aceite con la fase acuosa.
5. Cuidadosamente, se introduce el mezclador manual hasta el fondo del recipiente y se enciende, agitando en esta posición durante 1 minuto.
6. Con el mezclador encendido, se sube lentamente el impulsor hasta aproximadamente el 75% de la altura de líquido. Esto se realiza durante 3 minutos más, para un tiempo total de agitación de 4 minutos.

Luego de la preparación de las muestras, se realizó la medición de la distribución de diámetro de gota de cada una de ellas, utilizando el equipo Malvern Mastersizer 2000, repitiendo tres veces cada medición; en los casos donde hubo dispersión en los resultados, se realizaron mediciones adicionales.

Pruebas Tipo II: Barrido de Relación Volumétrica de Fases

En estas pruebas, se prepararon emulsiones con diferentes relaciones aceite/agua, para una concentración de surfactante comercial fija (7.800 ppm); a partir de esto se pudo determinar la relación aceite/agua óptima. De igual forma que en las pruebas tipo I, el barrido de relación volumétrica de fases se realizó para sistemas agua-aceite-surfactante. A continuación, en la tabla N° 5, se muestran las relaciones seleccionadas y las cantidades utilizadas durante la realización de esta prueba.

Tabla N° 5: Cantidades de aceite, agua y surfactante comercial utilizadas en el barrido de relación volumétrica de fases.

	Relación Aceite/Agua (Porcentaje)									
	70/30		75/25		80/20		85/15		90/10	
	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%	Peso (gr.)	%
Aceite	490,0	70,0	525,0	75,0	560,0	80,0	595,0	85,0	630,0	90,0
Agua	204,5	29,2	169,5	24,2	134,6	19,2	99,5	84,2	64,5	89,2
Surfactante	5,5	0,8	5,5	0,8	5,4	0,8	5,5	0,8	5,5	0,8
Total	700,0	100,0	700,0	100,0	700,0	100,0	700,0	100,0	700,0	100,0

El procedimiento de preparación de las muestras fue el mismo que el empleado en las pruebas tipo I, lo que cambió únicamente fueron las cantidades de cada compuesto. De la misma forma, se realizó la medición de la distribución de diámetro de gota de cada muestra, utilizando el equipo Malvern Mastersizer 2000; repitiendo tres veces la medición para cada una y realizando mediciones adicionales en los casos en que fue necesario.

Pruebas Tipo III: Efecto de la Concentración y Tipo de Espesante

En lo que se refiere al análisis del efecto de la concentración y tipo de espesante sobre las propiedades del producto, se evaluaron diferentes aditivos espesantes: goma Xantan, Carragenato y goma Tara (ver anexo N° 6). Esto se realizó con la finalidad de estudiar la influencia de este tipo de aditivos en las características reológicas de la vinagreta ligera de parchita; además permitió determinar cuál es la concentración y tipo de espesante óptimo, dentro del alcance del estudio.

En la realización de estas experiencias, se preparó primero la emulsión concentrada, para luego en la etapa de dilución, agregar el resto de los ingredientes (según el caso). A continuación, en la tabla N° 6, se muestran las cantidades utilizadas durante la preparación de la emulsión concentrada, cuyo procedimiento de preparación es el mismo que el descrito en las pruebas anteriores.

Tabla N° 6: Cantidades de aceite, agua (o pulpa) y surfactante comercial utilizadas en la preparación de la emulsión concentrada.

	Emulsión Concentrada	
	600 gr. de muestra	
	Peso (gr.)	%
Aceite	476,2	79,4
Agua o Pulpa (según el caso)	119,1	19,8
Surfactante	4,7	0,8
Total	600,0	100,0

La utilización de agua o pulpa de parchita en la emulsión concentrada dependió de la experiencia que se estaba realizando ya que, en primer lugar, se prepararon muestras en las que se trabajó con un sistema en limpio, es decir, aquel que contenía únicamente: emulsión concentrada, espesantes, sal, vinagre, mostaza y agua. En este tipo de sistemas, no se agregaron los aditivos conservantes y edulcorantes, así como tampoco la pulpa de parchita; por lo que la emulsión concentrada fue preparada con agua. Estos sistemas se prepararon con la finalidad de estudiar el comportamiento reológico característico de los aditivos espesantes sin la influencia de la pulpa de

parchita. A continuación, en la tabla N° 7, se muestran las concentraciones empleadas de los aditivos, sin especificar cuál de ellos se utilizó en cada caso por razones de confidencialidad, de igual forma, las cantidades utilizadas de cada ingrediente no pueden ser presentadas.

Tabla N° 7: Concentración de espesantes empleada en la etapa de dilución durante la preparación de los sistemas en limpio.

Etapa de dilución. Sistemas en limpio		
Espesante y Concentración	Espesante N° 1: 2.700 ppm	Espesante N° 1: 2.700 ppm - Espesante N° 2: 2.500 ppm

Una vez evaluados los sistemas en limpio, se procedió a la preparación de muestras que incluían todos los ingredientes de la formulación, donde se utilizó pulpa para la preparación de la emulsión concentrada. En primer lugar, se preparó una muestra utilizando el espesante N° 1 a una concentración de 2.700 ppm; esto se realizó con la finalidad de comparar su comportamiento reológico con el asociado a la muestra en limpio que igualmente contenía 2.700 ppm del mismo aditivo. Esta comparación fue realizada para cuantificar la influencia de la presencia de pulpa de parchita sobre la viscosidad de la vinagreta ligera.

Con la finalidad de continuar evaluando el desempeño del espesante N° 1 utilizado como único aditivo, se preparó una muestra que contenía 4.500 ppm, para poder comparar su comportamiento reológico con el de la muestra anterior. Éste es el espesante que se está utilizando actualmente en la empresa, y con él se han obtenido buenos resultados de viscosidad en las vinagretas tradicionales (no ligeras). También se evaluó la utilización del espesante N° 2 como único aditivo de la formulación, a una concentración de 2.700 ppm.

Finalmente, se evaluó el efecto sinérgico del espesante N° 1 en combinación con los aditivos N° 2 y N° 3. Esto con la finalidad de analizar si la utilización de estas combinaciones de aditivos, logra potenciar el efecto espesante y, por lo tanto,

aumentar la viscosidad de la vinagreta ligera , con el objetivo de semejar la viscosidad de la tradicional. A continuación, en la tabla N° 8, se muestran los aditivos espesantes combinados y las concentraciones empleadas .

Tabla N° 8: Espesantes y concentración empleadas en la etapa de dilución durante la evaluación de los efectos sinérgicos.

Etapa de dilución. Todos los ingredientes de la formulación		
Espesante y Concentración	Espesante N° 1: 2.700 ppm - Espesante N° 2: 2.000 ppm	Espesante N° 1: 2.700 ppm - Espesante N° 3: 1.000 ppm

El procedimiento de preparación empleado para todas las muestras descritas en esta sección consistió en lo siguiente:

1. Para la preparación del gel de espesante(s), se pesa(n) el(los) espesante(s) en polvo, utilizando la balanza analítica .
2. Se agrega el aceite en la cantidad correspondiente, y se homogeniza con un agitador de vidrio para dispersar el polvo.
3. En un recipiente aparte, se pesa el agua libre, la cual se agrega a una temperatura de aproximadamente 60° C.
4. Se introduce hasta el fondo del recipiente el mezclador manual y se enciende para comenzar con la agitación.
5. Se agrega poco a poco el aceite que contiene el(los) espesante(s) disperso(s).
6. Se agrega la sal, y se continúa agitando por 2 minutos hasta que pueda observarse que ha aumentado la viscosidad (formación del gel).

7. En otro recipiente, se agregan el vinagre, la mostaza y el agua por pulpa, y se agita con el mezclador manual hasta homogenizar. En caso de que la muestra incluya todos los ingredientes de la formulación, son agregados también en este momento los conservantes, los edulcorantes y pulpa de parchita.
8. Se agrega allí la emulsión concentrada, preparada con anterioridad, y se continúa agitando hasta homogenizar (2 minutos aproximadamente).
9. Finalmente se agrega a este recipiente el gel de espesante(s) preparado, y se agita durante otros 3 minutos.

La propiedad de interés en la evaluación de aditivos espesantes es la viscosidad de las muestras, por lo que ésta fue medida utilizando un viscosímetro rotacional Brookfield, a las diferentes velocidades de rotación (6, 12, 30 y 60 rpm). La medición se realizó dos veces para cada una de las velocidades, y se realizaron mediciones adicionales en los casos donde se observó desviación en los resultados (ver anexo N° 7).

Pruebas Tipo IV: Estabilidad en el Tiempo

En estas pruebas, se realizó una evaluación de la estabilidad estática en el tiempo de la emulsión final (vinagreta ligera) para dos producciones diferentes de la empresa. Para la primera producción solo se midió la distribución de tamaño de gota; en cambio, para la producción N° 2 fueron medidas tanto la distribución de tamaño de gota como la viscosidad. Estas propiedades se midieron de forma mensual, en ambos casos, durante un período de seis meses; de la misma forma, se reportaron las características visuales de la vinagreta para determinar sus cambios en el período de tiempo del estudio.

De forma similar a las pruebas anteriores, la distribución de diámetro de gota se midió tres veces para cada evaluación, utilizando el Malvern Mastersizer 2000. La

viscosidad fue medida dos veces para cada velocidad disponible en el viscosímetro rotacional Brookfield, esto en cada una de las evaluaciones mensuales. También se realizaron mediciones adicionales en los casos donde fue necesario por dispersión de los resultados.

Pruebas Tipo V: Mezclado

En estas pruebas, se prepararon emulsiones concentradas según las proporciones (porcentajes) expresadas en la tabla N° 6, con la finalidad de evaluar la influencia de los parámetros y variables de mezclado sobre la distribución de tamaño de gota de la emulsión. Las variables estudiadas en este caso son la velocidad y tiempo de agitación, así como la configuración geométrica del sistema de mezclado; ésta se encuentra relacionada a: las dimensiones del recipiente donde se prepara la emulsión, las dimensiones del impulsor y la altura de líquido.

A continuación, se presentan de manera específica las relaciones geométricas de interés para este estudio:

$$\frac{h_L}{D_R} \quad \frac{\text{Altura de líquido}}{\text{Diámetro del recipiente}} \quad (9)$$

$$\frac{D_i}{D_R} \quad \frac{\text{Diámetro del impulsor}}{\text{Diámetro del recipiente}} \quad (10)$$

En primer lugar, se realizó un barrido de diferentes velocidades de agitación, utilizando un impulsor del tipo estator-rotor durante un tiempo de agitación de 4 minutos para todas las emulsiones preparadas; esto para una configuración geométrica también fija, es decir, para un diámetro de recipiente y una altura de líquido constantes. La selección del tipo de impulsor a utilizar en todas las pruebas asociadas a mezclado, se realizó en base al equipo utilizado por la empresa que, en este caso, es un impulsor del tipo estator-rotor, el cual consiste en una parte fija (con

orificios que permiten el paso de fluido) situada alrededor de la parte móvil del impulsor.

Una vez seleccionada la velocidad de agitación más adecuada con base en la distribución de tamaño de gota y los diámetros de gota promedio obtenidos, se realizó un barrido de tiempo de agitación. Esto, con la finalidad de determinar su valor óptimo para la preparación de las emulsiones concentradas con éste sistema de mezclado. Se utilizó la velocidad de agitación seleccionada en la etapa anterior, es decir, 8.000 rpm; así como el mismo impulsor y configuración geométrica utilizados en el barrido de velocidad de agitación.

Por último, se evaluaron algunas configuraciones geométricas para la formación de las emulsiones, utilizando diferentes diámetros de recipiente y alturas de líquido. Esto se realizó nuevamente empleando el mismo impulsor del tipo estator-rotor, una velocidad de agitación de 8.000 rpm y el tiempo de agitación seleccionado en la etapa anterior, esto es, 6 minutos de agitación. Estas experiencias permitieron analizar la variación de la distribución de tamaños de gota respecto a las relaciones adimensionales de interés descritas en esta sección

El protocolo de mezclado empleado en estas experiencias consistió en agitar durante los 2 primeros minutos con el impulsor muy cercano al fondo del recipiente, esto con la finalidad de formar una emulsión del tipo O/W ya que, para formar este tipo de emulsiones, el impulsor al inicio de la agitación debe estar sumergido en la fase acuosa. Una vez transcurridos los primeros 2 minutos de agitación, el impulsor se colocó a una altura equivalente al 78% de la altura del líquido en todos los casos, manteniéndolo en esta posición hasta finalizar la agitación; esta ubicación del impulsor a partir de los 2 minutos de agitación se implementa con la finalidad de incorporar todo el aceite a la emulsión. Debido a la complejidad del protocolo de mezcla requerido para la formación de estas emulsiones, no pudo realizarse una evaluación acerca de la influencia de la relación altura del impulsor/altura de líquido

sobre la distribución de tamaño de gota, ya que la posición del impulsor es determinante en el tipo de emulsión formada.

En todas las experiencias asociadas a la evaluación del sistema de mezclado, la propiedad medida fue la distribución de tamaño de gota de las emulsiones formadas, esto se realizó tres veces para cada muestra, utilizando el equipo Malvern Mastersizer 2000, haciendo mediciones adicionales en caso de dispersión de los resultados.

Pruebas Adicionales

De forma adicional, se estudió el comportamiento reológico de una solución de goma Xantan, preparando una muestra de 3.500 ppm de dicho espesante en agua. Se midió la viscosidad de esta muestra para diferentes velocidades de rotación (viscosímetro Brookfield) con la finalidad de tener determinar su comportamiento reológico. Esto sirvió de base para el análisis de las pruebas tipo III (efecto de la concentración y tipo de espesante), ya que estos aditivos afectan significativamente la viscosidad de la mezcla en la que son utilizados y es probable que determinen su comportamiento reológico (ver anexo N° 8).

Además fue caracterizado el comportamiento reológico de la vinagreta de parchita tradicional (no ligera), se midieron a diferentes tasas de corte los valores de viscosidad utilizando nuevamente el viscosímetro Brookfield. Estos valores son reportados en el capítulo IV, de forma comparativa junto con los comportamientos reológicos de las muestras preparadas evaluando los diferentes aditivos espesantes.

Por otra parte, se determinó la distribución de tamaño de partícula de la pulpa de parchita (Malvern Mastersizer 2000), ya que ésta presenta partículas sólidas por estar hecha a partir de la fruta. Esto sirvió de base para analizar los resultados de la distribución de tamaño de gota de la vinagreta de parchita ligera.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección, se muestran los resultados obtenidos a partir de las experiencias realizadas para cumplir con los objetivos de este Trabajo Especial de Grado; así mismo, se presenta el análisis correspondiente.

Inducción a la Planta

Como parte de este estudio experimental, se participó en el procedimiento de manufactura de la vinagreta ligera de parchita dentro de la empresa Orinoquia; allí se tomaron muestras a diferentes tiempos durante la elaboración del producto. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para dos producciones diferentes de la empresa.

Producción N° 1

En la primera producción de vinagreta ligera de parchita en la que se participó, se tomaron muestras a diferentes tiempos de agitación tanto para la etapa concentrada como para la etapa de dilución. Es importante destacar que la emulsión concentrada de la producción N° 1, fue preparada con pulpa de parchita, aceite, surfactante y toda la mostaza de la formulación. A continuación, en el gráfico N° 1, se presentan las distribuciones de tamaño de gota obtenidas en la etapa concentrada.

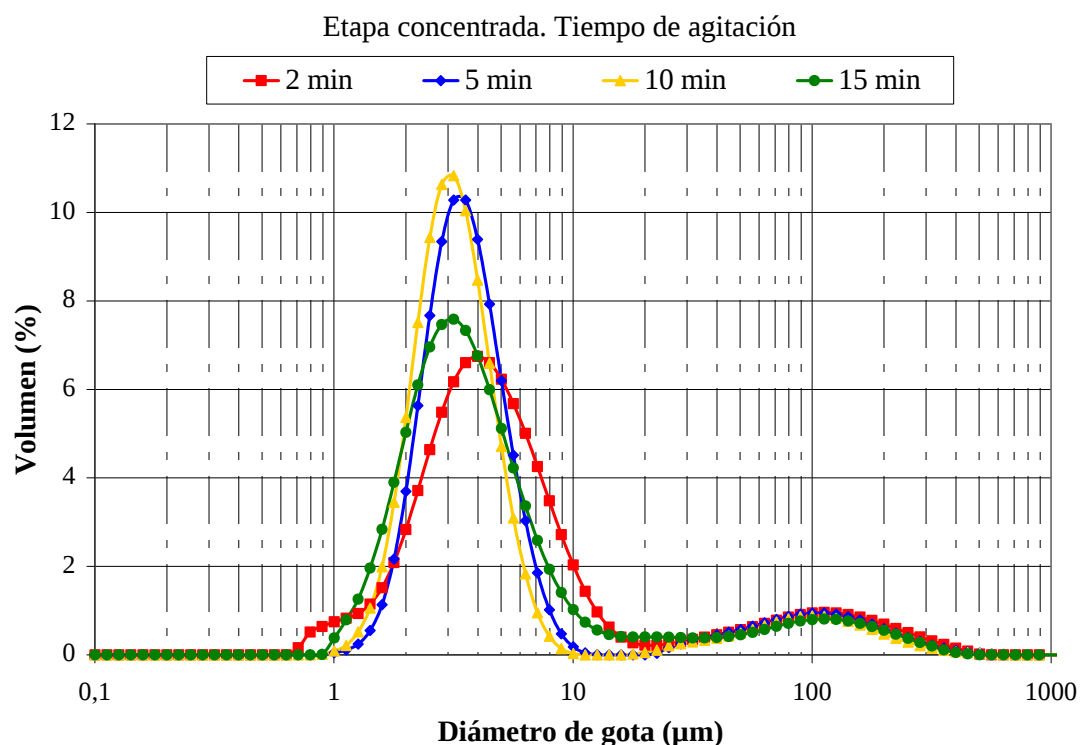


Gráfico N° 1: Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión concentrada respecto al tiempo de agitación (producción N° 1).

En el gráfico anterior, puede observarse la formación de dos modas en todas las distribuciones de tamaño de gota, es decir, se tienen distribuciones del tipo bimodal para todos los tiempos de agitación evaluados. La moda de menor tamaño, comienza formándose alrededor de 4 micras a los 2 minutos de mezclado, disminuyendo luego hasta aproximadamente 3 micras cuando se completan los 15 minutos, probablemente esta moda este conformada por las gotas de aceite formadas en la preparación de esta emulsión concentrada. Luego se observa otra moda de mucho mayor tamaño alrededor de 100 micras, la cual es constante para todos los tiempos de agitación y muy probablemente esté constituida por las partículas sólidas presentes en la pulpa de parchita.

De estar la moda alrededor de 100 micras constituida únicamente por las partículas asociadas a la pulpa, se puede afirmar que se obtuvieron buenos valores en las distribuciones de tamaño de ésta emulsión concentrada, ya que las gotas de aceite

formadas tendrían tamaños adecuados en términos de estabilidad de la emulsión, esto es, tamaños alrededor de las 3 micras. ⁽¹⁴⁾ Sin embargo, por estar presente la mostaza en esta emulsión concentrada, convendría analizar el efecto que esto tiene sobre la estabilidad de la emulsión final, es decir, de la vinagreta ligera.

A continuación, en el gráfico N° 2, se presentan las distribuciones de tamaño de gota obtenidas en la etapa de dilución a diferentes tiempos de agitación para esta primera producción.

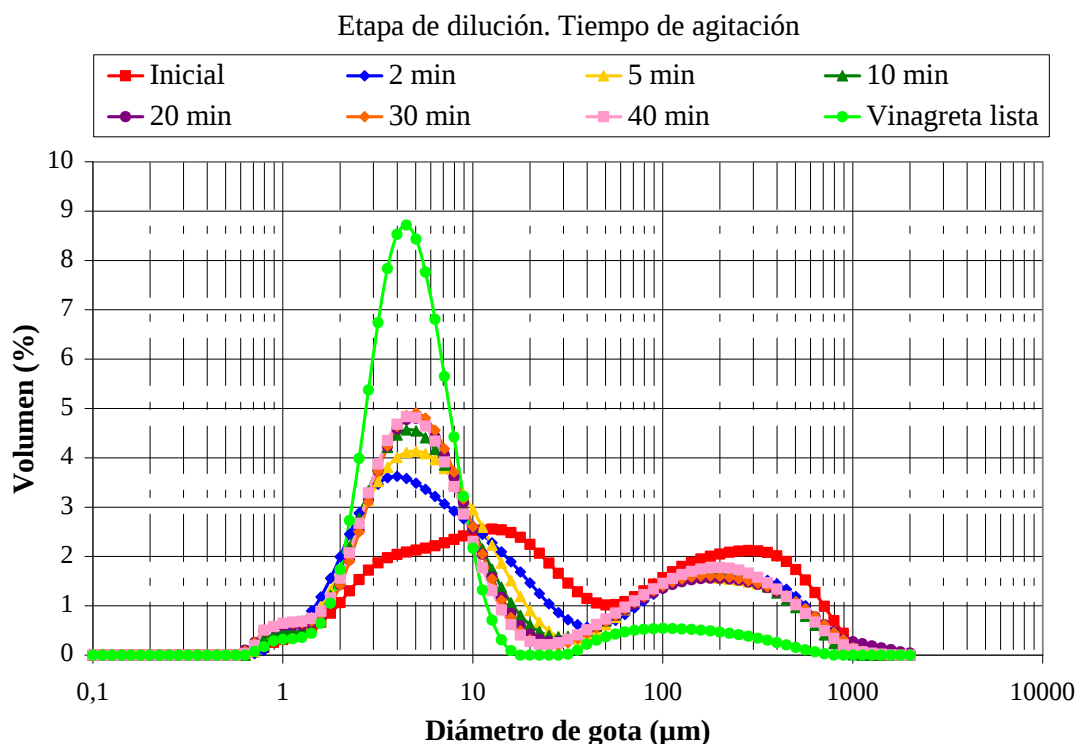


Gráfico N° 2: Variación de la distribución de tamaño de gota en la etapa de dilución respecto al tiempo de agitación (producción N° 1).

Como puede observarse, la distribución inicial (antes de iniciar la agitación) es bastante ancha y abarca altos tamaños de gota; lo que puede deberse a la presencia de aditivos sólidos sin dispersar, partículas de pulpa, entre otros. Sin embargo, a medida que se lleva a cabo la agitación en esta etapa, estas partículas se mezclan y dispersan, o bien, experimentan una disminución de tamaño como consecuencia de la agitación.

Este fenómeno, es posible que determine la forma y ancho de las distribuciones observadas en el gráfico anterior, en conjunto con la presencia de las gotas de aceite .

Finalmente, se obtiene una vinagreta cuya distribución de tamaño está bien definida, es del tipo bimodal con una tendencia a la formación de una moda alrededor de 1 micra, lo que es bastante satisfactorio porque indica mayor estabilidad en la emulsión durante el tiempo ya que, al existir gotas de menor tamaño, habrá una menor tendencia al fenómeno de coalescencia. ⁽¹⁴⁾

Para analizar la influencia de la presencia de pulpa de parchita sobre las distribuciones de tamaño de gota obtenidas durante la elaboración de la vinagreta ligera, conviene comparar las distribuciones de tamaño finales para cada etapa de la elaboración con la asociada a la pulpa de parchita. Esto se muestra a continuación en el gráfico N° 3.

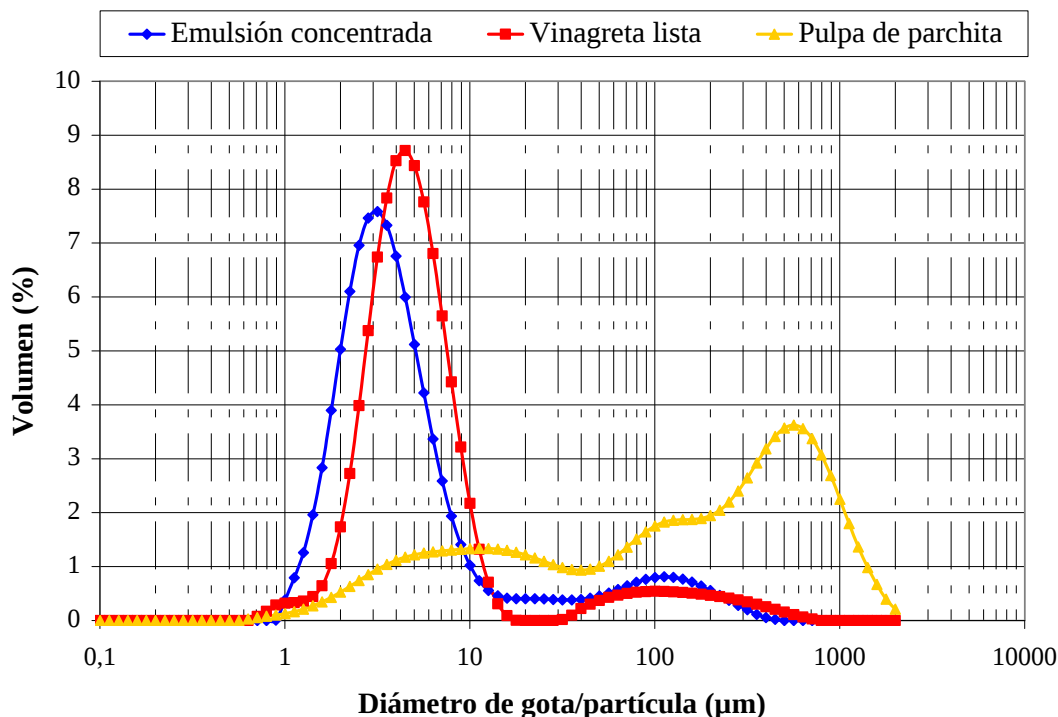


Gráfico N° 3: Distribuciones de tamaño de gota para las dos etapas del proceso en comparación con la distribución de tamaño de partícula de la pulpa de parchita (producción N° 1).

Con los resultados mostrados en el gráfico anterior se confirma la presencia de partículas sólidas en la pulpa de parchita, lo cual afecta las distribuciones de tamaño tanto en la emulsión concentrada como en la vinagreta lista, definiendo una moda alrededor de 100 micras en ambos casos.

Producción N° 2

En esta producción de vinagreta ligera de parchita, se tomaron muestras a diferentes tiempos de agitación tanto para la etapa concentrada como para la etapa de dilución. Es importante destacar que, a diferencia de la producción anterior, la emulsión concentrada fue preparada únicamente con agua, aceite y surfactante; esto con la finalidad de cuantificar los efectos de la pulpa de parchita y la mostaza, añadidas en el caso anterior. A continuación, en el gráfico N° 4, se presentan las distribuciones de tamaño de gota obtenidas en la etapa concentrada para esta segunda producción.

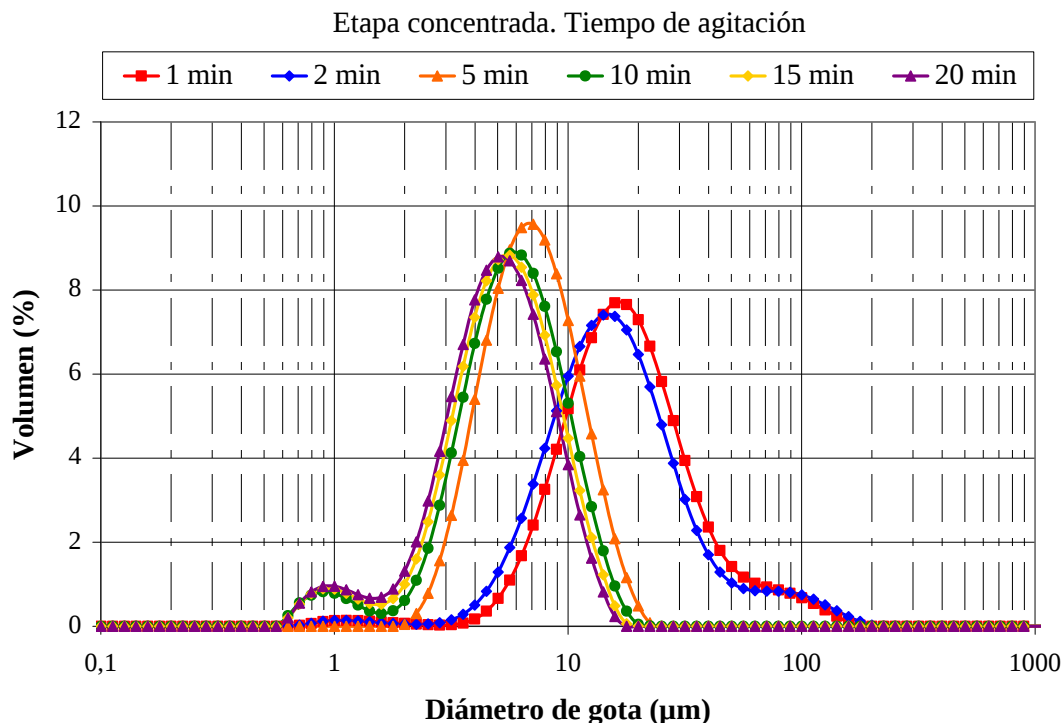


Gráfico N° 4: Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión concentrada respecto al tiempo de agitación (producción N° 2).

En este caso, se tomaron muestras con más frecuencia durante los 20 minutos de agitación que en la producción N° 1, para poder caracterizar mejor la variación en las distribuciones de tamaño de gota. Puede observarse que para los tiempos de agitación de 1 y 2 minutos, se tienen distribuciones unimodales con modas superiores a las 10 micras. Luego, a los 5 minutos de agitación, se observa un significativo desplazamiento de la distribución hacia menores tamaños de gota. A partir de los 10 minutos de agitación, se observa una ligera disminución en las modas de las distribuciones, ubicándose alrededor de las 5 micras; además se observa una tendencia de formación de una segunda moda de aproximadamente 1 micra. Esta tendencia se debe a la existencia en el sistema moléculas de surfactante aún disponibles para recubrir nuevas gotas de aceite formadas. ⁽³²⁾

En este caso, los tamaños de gota indican que se preparó una emulsión concentrada que debería ser bastante estable en el tiempo, debido a los bajos valores obtenidos. ⁽¹⁴⁾ Sin embargo, habría que evaluar el efecto que la etapa de dilución tendría sobre las distribuciones, ya que se incluiría pulpa de parchita en la preparación. A continuación, en el gráfico N° 5, se presentan las distribuciones de tamaño de gota obtenidas en la etapa de dilución, a diferentes tiempos de agitación, para la producción N° 2.

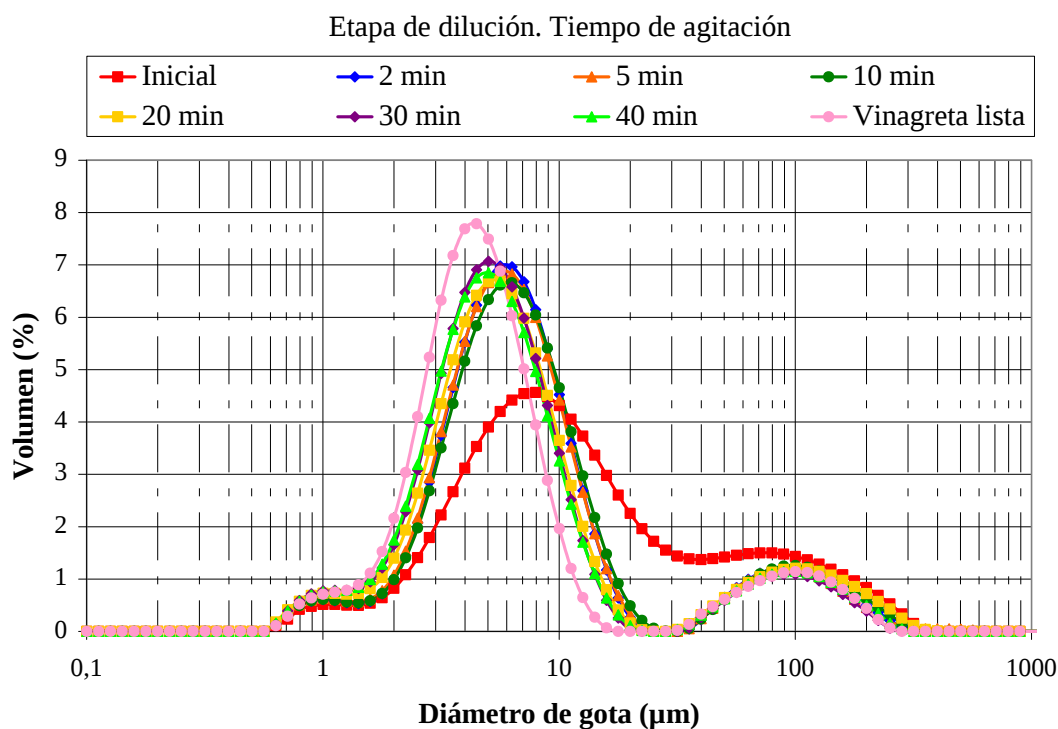


Gráfico N° 5: Variación de la distribución de tamaño de gota en la etapa de dilución respecto al tiempo de agitación (producción N° 2).

Al igual que en la producción N° 1, las distribuciones de tamaño en la etapa de dilución son bimodales, ya que al diluirse la emulsión concentrada se agrega pulpa de parchita, que en este caso no estuvo incluida inicialmente. De igual forma que en la producción anterior, la moda asociada a la pulpa de parchita también está alrededor de 100 micras.

Además, puede apreciarse que una vez comenzada la agitación en esta etapa, las distribuciones permanecen prácticamente constantes a lo largo de todo el proceso de mezclado; para llegar a una distribución de tamaños en la vinagreta final donde se establecen dos modas: la asociada a la pulpa (100 micras) y aquella correspondiente a las gotas de aceite de la emulsión, cuyo valor está alrededor de las 4 micras.

De igual forma que en la producción anterior, se comparan las distribuciones de tamaño finales para cada etapa de la elaboración, con la distribución de tamaño de

partícula de la pulpa de parchita. Los resultados obtenidos se presentan a continuación en el gráfico N° 6.

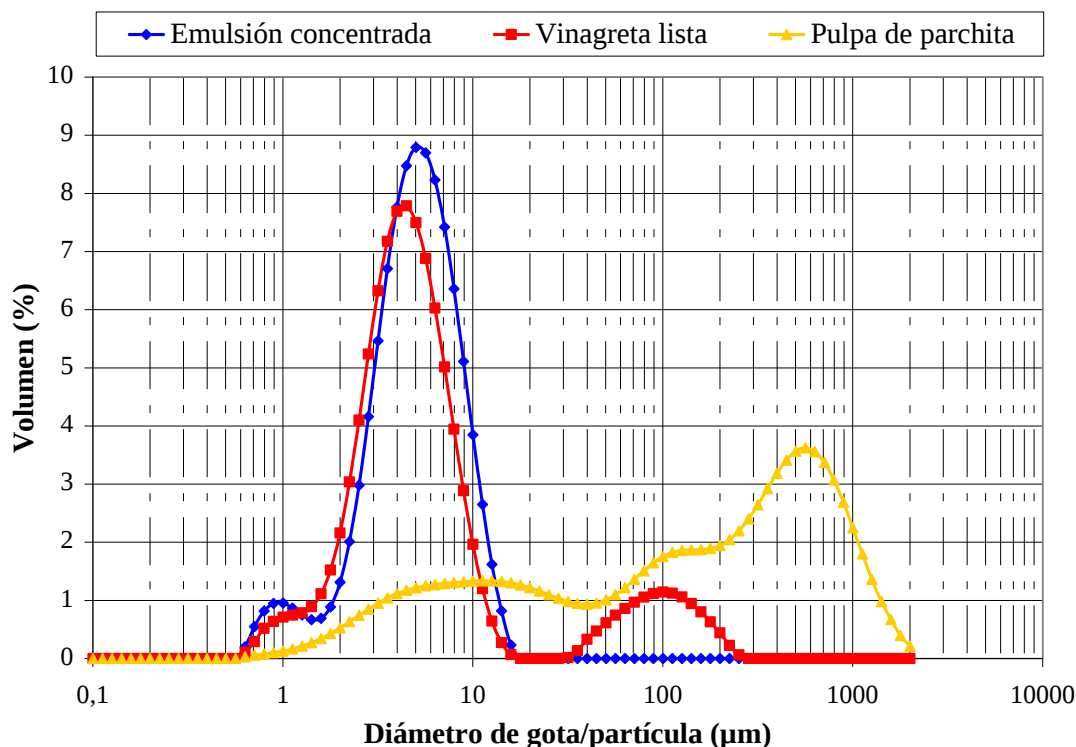


Gráfico N° 6: Distribuciones de tamaño de gota para las dos etapas del proceso en comparación con la distribución de tamaño de partícula de la pulpa de parchita (producción N° 2).

Los resultados obtenidos permiten afirmar que la moda de 100 micras aproximadamente, está asociada a las partículas sólidas de la pulpa. En este caso, la emulsión concentrada fue preparada con agua y, por lo tanto, no presenta esta moda alrededor de 100 micras; luego cuando se diluye y se agrega la pulpa de parchita, se obtiene una vinagreta cuya distribución es bimodal, debido a la presencia de partículas sólidas y gotas de aceite de menor tamaño.

En el gráfico N° 7, se presenta la variación del diámetro de gota promedio en volumen ($D[4, 3]$) respecto al tiempo de agitación, tanto para la etapa concentrada como para la de dilución, asociadas a la producción N° 2.

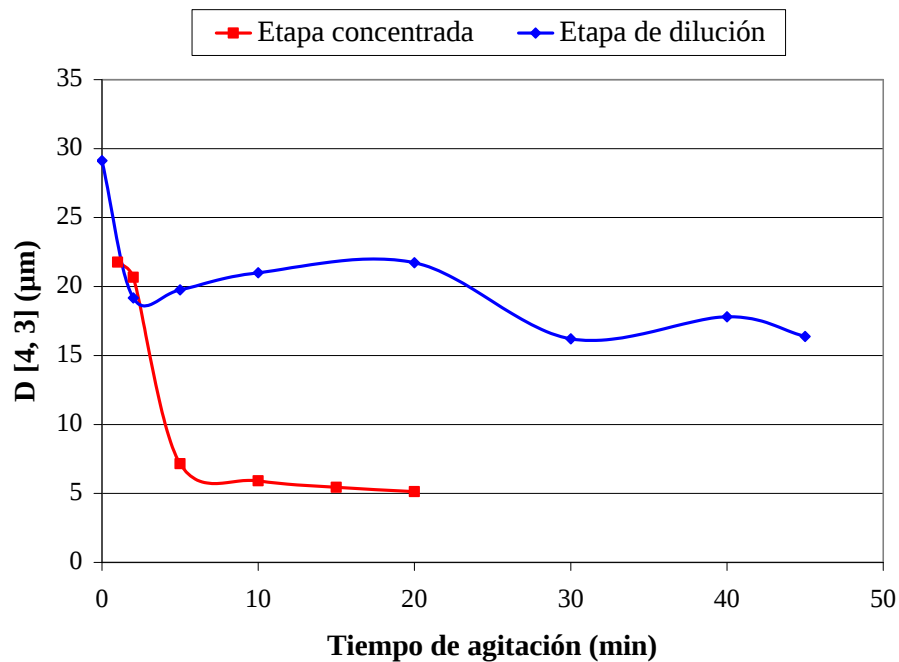


Gráfico N° 7: Variación del diámetro de gota promedio en volumen respecto al tiempo de agitación (producción N° 2).

En la etapa concentrada, se observa una disminución brusca en el diámetro de gota promedio durante los primeros 5 minutos de agitación, de ahí en adelante se presenta una disminución mucho más leve. Puede afirmarse que para los fines de esta aplicación, un tiempo de agitación de 10 minutos en la etapa concentrada es suficiente para obtener diámetros de gota adecuados en términos de estabilidad de la emulsión.

En la etapa de dilución, se puede considerar que después de 30 minutos de agitación el diámetro de gota promedio permanece constante. Cabe destacar, que la diferencia en el valor de diámetro de gota promedio entre el final de la etapa concentrada y el final de la diluida se debe a la incorporación de la pulpa, como ya se explicó anteriormente. En el gráfico N° 6 se pudo observar que la moda correspondiente a las gotas de aceite prácticamente no presenta variación entre una etapa y la otra.

Pruebas Tipo I: Barridos de Concentración de Agentes Surfactantes

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las experiencias asociadas a los barridos de concentración de agentes surfactantes, siendo los evaluados un surfactante comercial del tipo no iónico, la mostaza y la yema de huevo.

Surfactante comercial

En el grafico N° 8, se muestran las distribuciones de tamaño de gota de las emulsiones formadas utilizando el surfactante comercial (no iónico) en diferentes concentraciones.

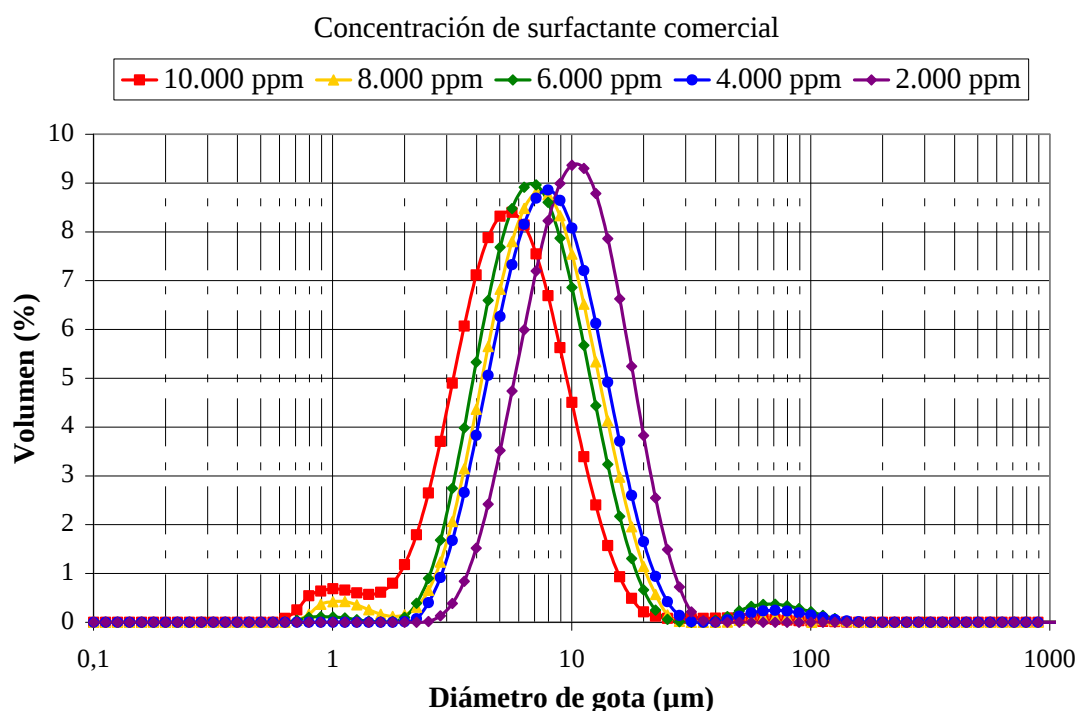


Gráfico N° 8: Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión respecto a la concentración de surfactante comercial utilizada.

Como puede observarse en el gráfico anterior, se obtuvieron mayores tamaños de gota en la emulsión a medida que se disminuía la concentración de surfactante no iónico. En todos los casos, la concentración de surfactante en las emulsiones preparadas está muy por encima de su concentración micelar crítica (CMC), es decir,

por encima de 660 ppm, aproximadamente. De esta forma, la disminución del tamaño de gota en la emulsión, a mayores concentraciones de surfactante, es consecuencia de la existencia en el sistema de más moléculas de surfactante disponibles para adsorberse en la interfase durante la emulsificación. Por esto, se favorece la formación de gotas más pequeñas, las cuales son estabilizadas rápidamente por la adsorción del surfactante antes de que se produzca el fenómeno de coalescencia; en otras palabras, se reducen los choques entre gotas no recubiertas por ser muy corto el período de tiempo entre la formación de la gota y la adsorción del surfactante en su superficie.⁽³²⁾

Desde el punto de vista práctico, es adecuado trabajar con un rango de concentraciones de surfactante mucho mayores a la CMC. En estos casos, la concentración adecuada de surfactante va mucho más allá de su concentración micelar crítica, y generalmente suele determinarse con la ayuda de pruebas de estabilidad estática en el tiempo.

En cuanto a las distribuciones de tamaño de gota obtenidas, se tiene que son prácticamente unimodales, y sus modas se encuentran entre 4 y 10 micras, aproximadamente. Este rango de tamaños de gota es adecuado para la preparación de la emulsión concentrada, ya que se obtendría un producto final con las propiedades deseadas. Es importante destacar que la posterior dilución de esta emulsión podría afectar el tamaño de sus gotas; sin embargo, como el rango de concentraciones de surfactante evaluadas está muy por encima de su CMC, la etapa de dilución no debería tener un efecto significativo sobre la distribución de tamaños de gota. Es entonces la concentración óptima de surfactante comercial un valor que equilibre la distribución de tamaños de gota, la estabilidad de la emulsión en el tiempo y los costos de manufactura.

A continuación, en la tabla N° 9, se presentan los valores del diámetro de gota promedio en volumen ($D_{[4, 3]}$) y del span, asociados a las distribuciones presentadas

en el gráfico anterior. Es importante destacar que el span es un parámetro que se refiere a la difusión y/o extensión de la distribución de tamaños de gota, en otros términos, a si la distribución es estrecha o ancha. ⁽⁴²⁾ Tanto el D [4, 3] como el span, son esenciales a la hora de evaluar una distribución de tamaño de gota en términos de estabilidad de la emulsión.

Tabla N° 9: Valores de D [4, 3] y span asociados a las distribuciones de tamaño de gota del barrido de concentración de surfactante comercial.

	Concentración de surfactante comercial (ppm)				
	10.000	8.000	6.000	4.000	2.000
D [4, 3] (μm)	6,050	7,277	8,765	9,442	10,575
Span (10% - 90%)	1,508	1,388	1,402	1,399	1,262

El diámetro de gota promedio aumenta para menores concentraciones de surfactante comercial, esto debido a la menor disponibilidad de moléculas de surfactante a medida que se disminuye su concentración y, por lo tanto, más lentamente se lleva a cabo la adsorción en la interfase, como fue explicado anteriormente (ver gráfico N° 11).

También se observa que todas las distribuciones tienen una extensión similar, es decir, los valores de span para las distribuciones estudiadas son bastante cercanos. Esto también pudo apreciarse en el gráfico N° 8, ya que independientemente de la concentración de surfactante utilizada, el ancho de las distribuciones es bastante similar; esto se debe a que las muestras fueron preparadas utilizando el mismo sistema de mezclado, siendo los aspectos mecánicos involucrados los mismos y, por ende, todas las emulsiones estuvieron sometidas al mismo campo de cizallamiento. ⁽¹³⁾

Mostaza

En segundo lugar, se presentan en el gráfico N° 9, las distribuciones de tamaño de gota de las emulsiones formadas utilizando mostaza como agente surfactante en diferentes concentraciones.

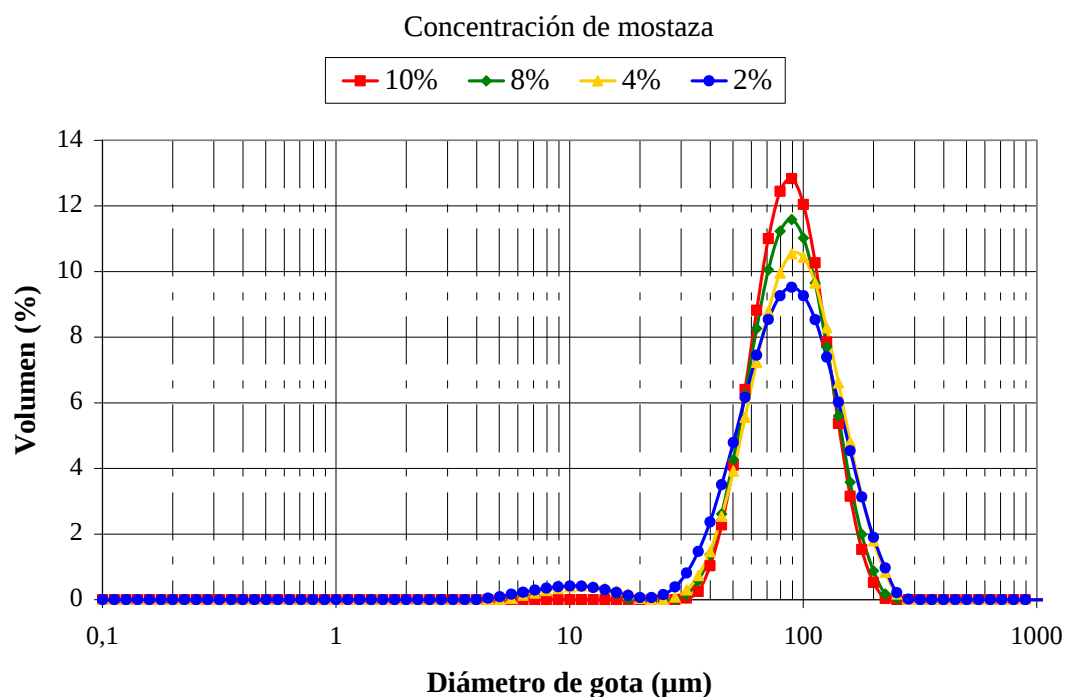


Gráfico N° 9: Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión respecto a la concentración de mostaza utilizada.

En el gráfico anterior se observa que las distribuciones de tamaño de gota de las emulsiones formadas son muy similares, independientemente de la concentración de mostaza utilizada. Puede observarse que a medida que varía la concentración de mostaza, las modas de las distribuciones permanecen prácticamente constantes, en un valor cercano a las 100 micras.

Es importante destacar, que a pesar de que los valores de diámetro de gota y las distribuciones de tamaño fueron similares para todos los casos, las muestras de 4% y 2% de mostaza presentaron una fase acuosa separada tan solo un día después de su preparación. Por esto, puede afirmarse que no son concentraciones adecuadas para la preparación de la emulsión concentrada, porque a partir de ellas no se obtienen emulsiones estables.

Entre los numerosos factores que influyen en la formación de emulsiones se encuentran la concentración del agente surfactante y la relación aceite/agua. ⁽¹¹⁾ Si

bien en esta experiencia era de esperarse una disminución del diámetro de gota a medida que aumenta la concentración del agente surfactante (presente en la mostaza preparada), se tiene que a medida que aumenta la concentración de mostaza también aumenta la cantidad de fase acuosa, por ser mostaza preparada (alto porcentaje de agua) la utilizada en la formulación; por consiguiente, la relación aceite /agua varía de una muestra a otra. Más específicamente, a medida que aumenta la concentración de agente surfactante se favorece la disminución de tamaño de gota y, por el contrario, a medida que aumenta la cantidad de fase acuosa se favorece el aumento del tamaño de gota en la emulsión. ⁽⁴³⁾ Estos efectos contrarios, pudiesen ser la razón por la cual en estas experiencias, la distribución de tamaño es prácticamente constante para todas las concentraciones de mostaza evaluadas.

A continuación, en la tabla N° 10, se presentan los valores del D [4, 3] y del span, asociados a las distribuciones de tamaño de gota del barrido de concentración de mostaza.

Tabla N° 10: Valores de D [4, 3] y span asociados a las distribuciones de tamaño de gota del barrido de concentración de mostaza.

	Concentración de mostaza (%)			
	10	8	4	2
D [4, 3] (µm)	86,862	85,588	90,700	87,340
Span (10% - 90%)	0,911	1,026	1,130	1,261

Como puede apreciarse en la tabla anterior, los diámetros de gota promedio no siguen ninguna tendencia en particular a medida que disminuye la concentración de mostaza, siendo sus valores similares. Esto reafirma lo observado en el gráfico N° 9, donde se reflejan distribuciones de tamaño muy parecidas para las diferentes concentraciones de mostaza utilizadas. Muy probablemente, esto pueda estar asociado al aumento de la cantidad de fase acuosa para mayores concentraciones de agente surfactante.

De la misma forma, la extensión de las distribuciones (span) es bastante similar, siendo mayor a medida que se disminuye la concentración de mostaza. Esto era de esperarse, ya que a mayores concentraciones de agente surfactante, más estables serán las emulsiones obtenidas; lo que se traduce además en que tendrán distribuciones de tamaño de gota más estrechas (menor span).

Por todo el análisis presentado anteriormente, puede afirmarse que no conviene incluir la mostaza en la formulación de la emulsión concentrada durante la manufactura de la vinagreta, ya que el único efecto práctico que tendría sería un aumento en la cantidad de fase acuosa, afectando las propiedades de la emulsión resultante.

Yema de huevo

A continuación, en el gráfico N° 10, se muestran las distribuciones de tamaño de gota de las emulsiones formadas utilizando yema de huevo como agente surfactante en diferentes concentraciones.

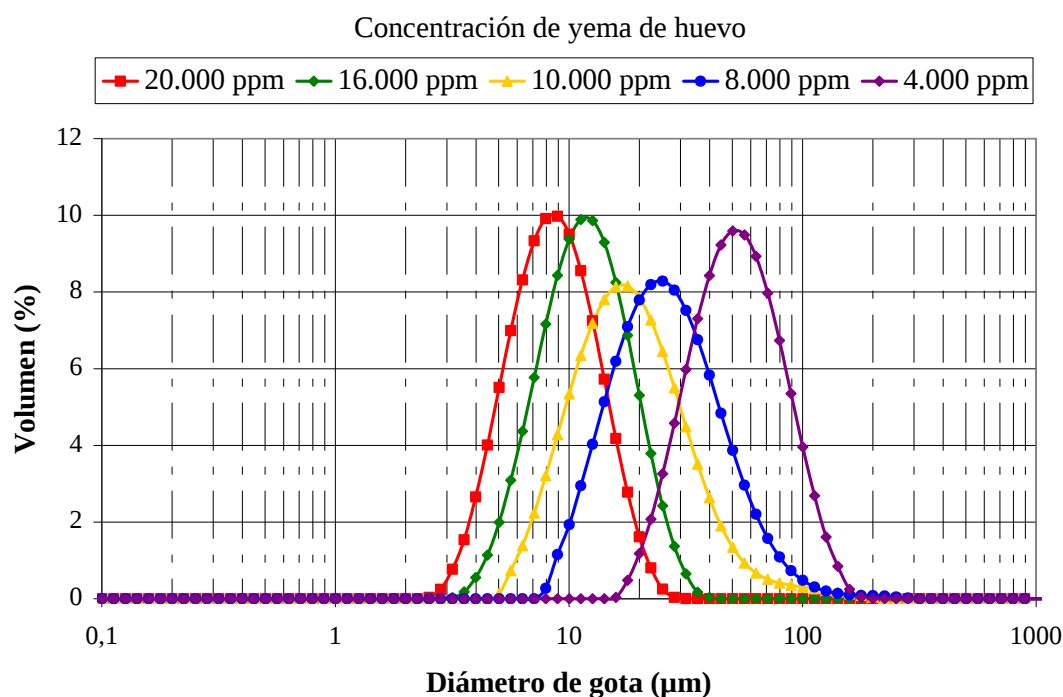


Gráfico N° 10: Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión respecto a la concentración de yema de huevo utilizada.

En este caso, las distribuciones de tamaño de gota son nuevamente unimodales, pero el rango de modas es bastante amplio en comparación con los anteriores, entre 10 y 50 micras aproximadamente. Se observa la misma tendencia que en el caso del surfactante comercial, a mayores concentraciones de yema de huevo menores serán los tamaños de gota en la emulsión; lo que confirma las propiedades emulsificantes de la yema de huevo. Sin embargo, se necesitarían concentraciones altas para lograr un menor tamaño de gota durante la manufactura de la vinagreta, lo que traería problemas en cuanto a su sabor y a su formulación, por su valor y aporte nutricional.

En la tabla N° 11, se presentan los valores del D [4, 3] y del span, asociados a las distribuciones de tamaño de gota del barrido de concentración de yema de huevo.

Tabla N° 11: Valores de D [4, 3] y span asociados a las distribuciones de tamaño de gota del barrido de concentración de yema de huevo.

	Concentración de yema de huevo (ppm)				
	20.000	16.000	10.000	8.000	4.000
D [4, 3] (μm)	8,773	11,993	20,891	29,187	54,004
Span (10% - 90%)	1,183	1,195	1,629	1,572	1,241

En este caso, el aumento del diámetro de gota promedio a medida que disminuye la concentración del agente surfactante, es bastante pronunciado; lo que indica que deberían utilizarse concentraciones mucho mayores con la finalidad de evitar cambios significativos en las propiedades de la emulsión. En otros términos, si se utilizan concentraciones de yema de huevo dentro del rango evaluado, las variaciones en las propiedades del producto podrían ser notables para pequeñas variaciones en su formulación.

En cuanto al span, se tiene que nuevamente las distribuciones son parecidas en extensión, ya que los valores de este parámetro son similares para todas las distribuciones de tamaño de gota estudiadas. Esto indica, que la estabilidad de todas las emulsiones preparadas será similar; sin embargo, como en la producción de la vinagreta se diluye la emulsión concentrada, no es posible determinar a este nivel si las emulsiones finales tendrán la misma estabilidad en el tiempo, ya que el efecto de la dilución en este sentido es determinante.

Análisis comparativo

Una vez analizados todos los resultados de los barridos de concentración de agentes surfactantes, resulta interesante comparar las propiedades emulsificantes del surfactante comercial con las de la yema de huevo. La mostaza no es incluida en este análisis comparativo, ya que los resultados obtenidos al utilizarla en la emulsión concentrada no fueron satisfactorios en términos de las propiedades de la emulsión.

A continuación, se presenta el gráfico N° 11 donde se muestran los diámetros de gota promedio en volumen ($D [4, 3]$) en función de la concentración de agente surfactante utilizado, esto es para las emulsiones preparadas utilizando surfactante comercial y yema de huevo.

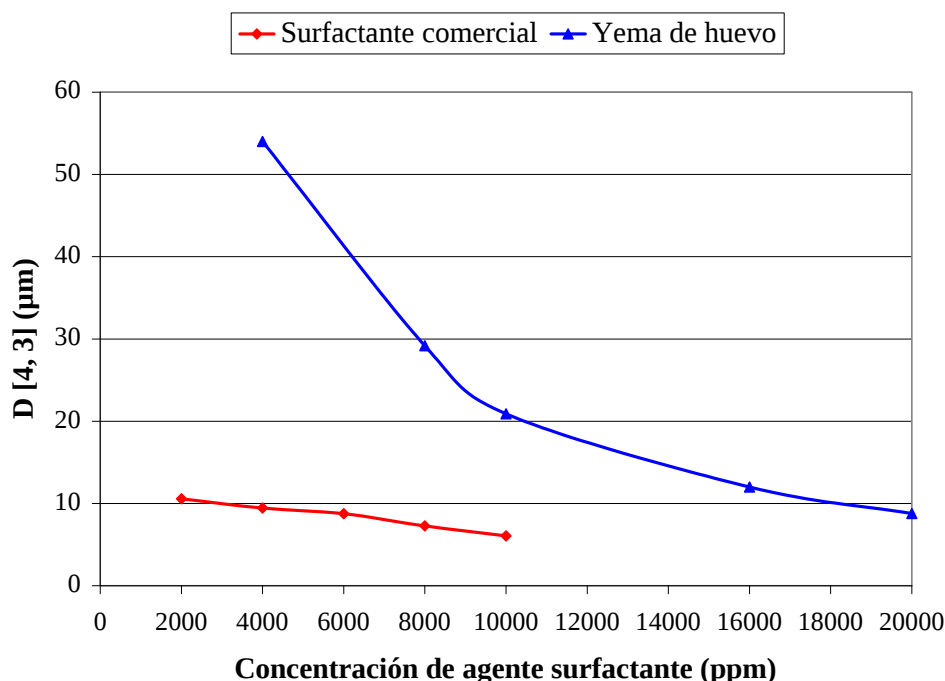


Gráfico N° 11: Variación del diámetro de gota promedio en volumen respecto a la concentración y tipo de agente surfactante utilizado.

En el caso de la yema de huevo, puede observarse que la variación en el diámetro de gota promedio para pequeñas variaciones en su concentración es significativa, lo que traería problemas en cuanto al mantenimiento de las propiedades de la vinagreta entre una producción y otra. Por el contrario, cuando se utiliza el surfactante comercial, la variación del diámetro de gota promedio es mucho menos pronunciada a medida que varía su concentración. Esta tendencia es muy importante a la hora de comparar estos agentes surfactantes, a pesar de que utilizando 20.000 ppm de yema de huevo, el diámetro de gota promedio se acerca a los valores obtenidos utilizando el surfactante comercial.

En la manufactura de la vinagreta de parchita ligera, se buscan menores diámetros de gota en la emulsión concentrada para obtener (entre otras propiedades) emulsiones más estables en el tiempo. Convendría entonces utilizar mayores concentraciones de yema de huevo para obtener diámetros de gota menores; sin embargo, esto podría traer problemas en cuanto al sabor y aporte nutricional de la vinagreta. Por esto, se puede afirmar que es más conveniente utilizar el surfactante comercial, con el cual se obtienen diámetros de gota lo suficientemente pequeños, para bajas concentraciones.

Además, la empresa posee experiencia utilizando el surfactante comercial en otros productos y se sabe que, para el rango de concentraciones utilizadas en este caso, las emulsiones no tienen problemas de estabilidad en el tiempo incluso después de la etapa de dilución. En este sentido, convendría realizar pruebas adicionales con la yema de huevo, donde se cubra un mayor rango de concentraciones y se lleve a cabo el proceso de dilución, para evaluar de forma completa su utilización como agente surfactante.

Pruebas Tipo II: Barrido de Relación Volumétrica de Fases

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las experiencias asociadas al barrido de relación volumétrica de fases. En la tabla N° 12, se presentan los valores del D [4, 3] y del span, asociados a las distribuciones de tamaño de gota del barrido de relación volumétrica de fases.

Tabla N° 12: Valores de D [4, 3] y span asociados a las distribuciones de tamaño de gota del barrido de relación volumétrica de fases.

	Relación O/W (%)				
	70/30	75/25	80/20	85/15	90/10
D [4, 3] (µm)	6,270	5,803	5,536	5,287	8,994
Span (10% - 90%)	1,354	1,327	1,338	1,385	1,854

Los valores presentados en la tabla anterior, describen una disminución leve y luego aumento brusco en los tamaños de gota en la emulsión; así como también, en el caso

del span, distribuciones más angostas y muy similares en extensión para las relaciones volumétricas de fases desde 70/30 hasta 85/15, para luego, al aumentar la fase aceite hasta una relación O/W de 90/10, obtener una distribución mucho más ancha que las anteriores.

Estos resultados, presentados en la tabla N° 12, siguen la tendencia descrita en la bibliografía para el caso de emulsiones cuya fase interna es más viscosa que la externa. ⁽⁴³⁾ En estos casos, la composición tiene un efecto muy importante sobre los tamaños de gota en la emulsión, siendo éstos menores a medida que se aumenta el contenido de fase interna, con un mínimo muy cercano a la relación volumétrica de fases en la cual se invierte la emulsión. Por esto, podría explicarse el hecho de que la muestra asociada a una relación O/W de 90/10 presente un aumento brusco en su diámetro de gota promedio en volumen ya que, a pesar de todavía sigue siendo una emulsión fase interna aceite, la coalescencia de las gotas es mucho más frecuente y, por lo tanto, se observa este aumento en el tamaño de gota. Es de suponer entonces, que para el sistema estudiado, la relación volumétrica de fases en la que se produciría el fenómeno de inversión, es un valor muy cercano a una relación aceite/ agua de 90/10.

A continuación, se presenta la variación del diámetro de gota promedio en volumen de forma gráfica, con la finalidad de que sea más sencillo explicar la posterior selección de la relación volumétrica de fases óptima para la manufactura de la vinagreta de parchita ligera.

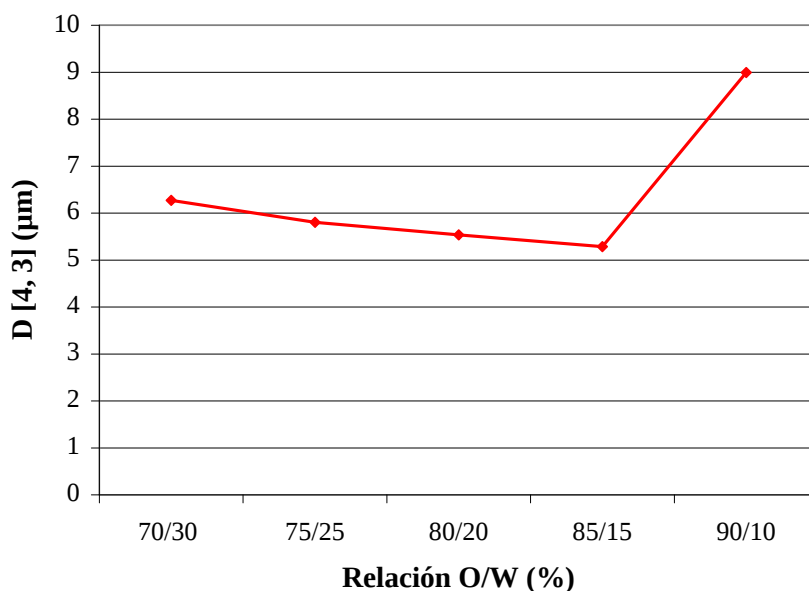


Gráfico N° 12: Variación del diámetro de gota promedio en volumen respecto a la relación volumétrica de fases.

En el gráfico anterior se observa la tendencia anteriormente descrita, una leve disminución y luego aumento brusco en los tamaños de gota en la emulsión, a medida que aumenta la cantidad de aceite presente. En el caso de la formación de la emulsión concentrada para la manufactura de la vinagreta de parchita ligera, el criterio de selección para determinar la relación volumétrica de fases óptima es aquella para la cual se obtengan los menores tamaños de gota en la emulsión. Esto se debe a que a menores tamaños de gota se obtienen emulsiones más estables. ⁽¹⁴⁾

En el gráfico N° 13, se muestran las distribuciones de tamaño de gota de las emulsiones formadas para las diferentes relaciones O/W.

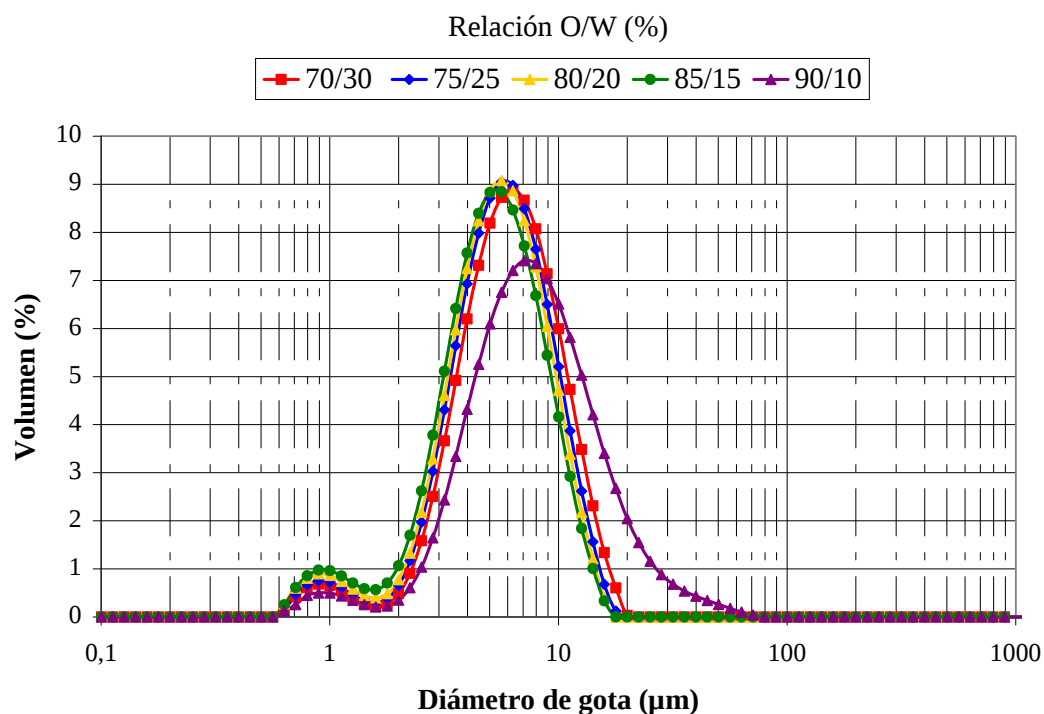


Gráfico N° 13: Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión respecto a la relación volumétrica de fases.

En el gráfico anterior, puede observarse que a medida que aumenta la cantidad de fase aceite (interna) para las cuatro primeras relaciones, se incrementa ligeramente la tendencia a la formación de una moda de aproximadamente 1 micra, razón por la cual se tiene una disminución en los diámetros de gota promedios; luego, cuando se aumenta la cantidad de fase aceite hasta una relación O/W de 90/10, se observa un cambio brusco en la forma de la distribución de tamaños y un significativo aumento en su moda. También puede apreciarse que la forma de las distribuciones en los cuatro primeros casos (relaciones O/W desde 70/30 hasta 85/15) es muy similar, tanto en extensión como en la presencia una moda muy marcada alrededor de 6 micras y otra en formación alrededor de 1 micra; por otra parte, en el caso de la emulsión de relación O/W igual a 90/10, se observa una distribución mucho más ancha que las anteriores y con mayor tendencia a ser unimodal.

De acuerdo a los resultados anteriores, la relación 85/15 parecería la opción más adecuada ya que para ese caso se obtiene el diámetro de gota promedio mínimo de aproximadamente 5,3 micras; sin embargo, cuando se trata de operaciones industriales que manejan grandes cantidades de producción, es importante mantener un margen de error que permita obtener las propiedades deseadas en el producto a pesar de inestabilidades en el proceso. Por todo esto, la relación O/W recomendada en este caso sería la 80/20, para la cual el diámetro de gota promedio no es mucho mayor que en el caso de la relación 85/15. Además, como el procedimiento de elaboración implica una posterior dilución de la emulsión concentrada, la selección de su relación volumétrica de fases no es limitante sobre las características del producto final, ya que éste tendrá siempre una relación aceite/agua fija y diferente de aquella de la emulsión concentrada.

Pruebas Tipo III: Efecto de la Concentración y Tipo de Espesante

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las experiencias asociadas al estudio del efecto de la concentración y tipo de espesante; en este caso, el comportamiento reológico de las muestras es la propiedad de interés, por ser los aditivos espesantes añadidos al producto con la finalidad de modificar su viscosidad. Es importante destacar que, en todos los gráficos de esta sección, se presentará una curva de viscosidad asociada a la vinagreta de parchita tradicional (no ligera), esto se hace con la finalidad de compararla con las muestras preparadas, ya que la idea en este caso es lograr que la viscosidad de la vinagreta ligera de parchita sea lo más parecida posible a la de la tradicional.

En el gráfico N° 14, se muestra el comportamiento reológico de las muestras asociadas a los sistemas en limpio, es decir, aquellas muestras que fueron preparadas sin incluir pulpa de parchita, ni aditivos conservantes o edulcorantes en la formulación.

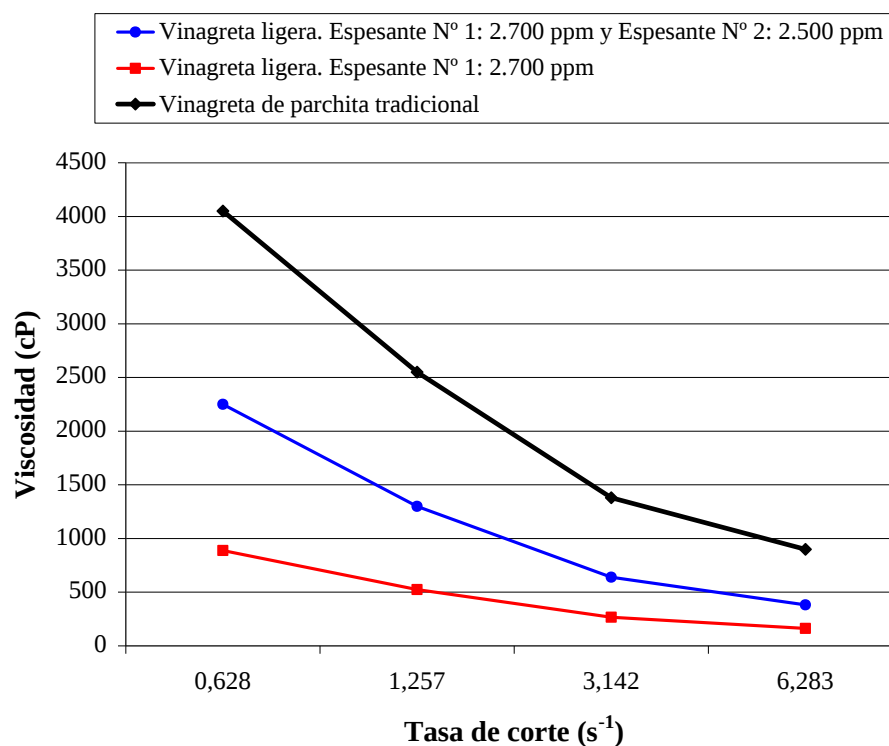


Gráfico N° 14: Comportamiento reológico de las muestras preparadas en limpio y de la vinagreta de parchita tradicional.

En este caso, fueron preparadas dos muestras en limpio, para poder analizar y comparar el comportamiento reológico característico de los aditivos espesantes evaluados, sin la influencia de la pulpa de parchita sobre esta propiedad. Puede observarse, que la viscosidad a las diferentes tasas de corte, es mayor para el caso donde se utilizan los dos espesantes, ya que la concentración total de estos aditivos es mucho mayor; el sistema que incluye únicamente el espesante N° 1 tiene una concentración de 2.700 ppm, por otra parte, la muestra que incluye los dos aditivos, tiene una concentración total de 5.200 ppm. Por esto, era de esperarse una viscosidad mayor para la muestra que contiene los aditivos espesantes N° 1 y N° 2, a todas las tasas de corte evaluadas. ⁽⁸⁾

Las muestras preparadas presentaron un comportamiento reológico del tipo pseudo - plástico, es decir, a medida que aumenta la tasa de corte a la que éstas están sometidas, su viscosidad disminuye ⁽¹¹⁾; de la misma forma que en el caso de la

vinagreta tradicional. Esta propiedad se debe a la presencia de los aditivos espesantes, que se utilizan intencionalmente para conferir este tipo de comportamiento a las soluciones (ver anexo N° 8). El hecho de que los sistemas estudiados sean emulsiones, no afecta en gran magnitud su comportamiento reológico ya que, si bien es cierto que los sistemas emulsionados de alto contenido de fase interna suelen presentar un comportamiento pseudo-plástico, en el caso de la vinagreta ligera la cantidad de fase aceite (interna) es bastante baja. ⁽²¹⁾

Es importante destacar que a pesar de que el comportamiento pseudo-plástico está mayormente determinado por la presencia de espesantes en las vinagretas, en el caso de la tradicional, se utiliza una concentración de espesante N° 1 de 2.700 ppm y la viscosidad es mucho mayor que aquella de la vinagreta ligera para la misma concentración de espesante. Esto se debe a que el contenido de aceite en la vinagreta tradicional es mayor al doble de la cantidad presente en la vinagreta ligera.

Como pudo observarse, las viscosidades de las dos muestras preparadas son significativamente menores que la de la vinagreta tradicional, esto se traduce en la necesidad de utilizar concentraciones mayores del espesante N° 1, o de evaluar la sinergia de éste con otros aditivos.

Una vez analizado el comportamiento para los sistemas en limpio, resulta interesante evaluar el efecto que tiene la pulpa de parchita sobre la viscosidad de las muestras, para ello se presentan en el gráfico N° 15, los comportamientos reológicos de dos muestras con una concentración de 2.700 ppm de espesante N° 1, pero siendo una de ellas un sistema limpio y la otra un sistema que incluye todos los ingredientes de la formulación (incluye pulpa de parchita).

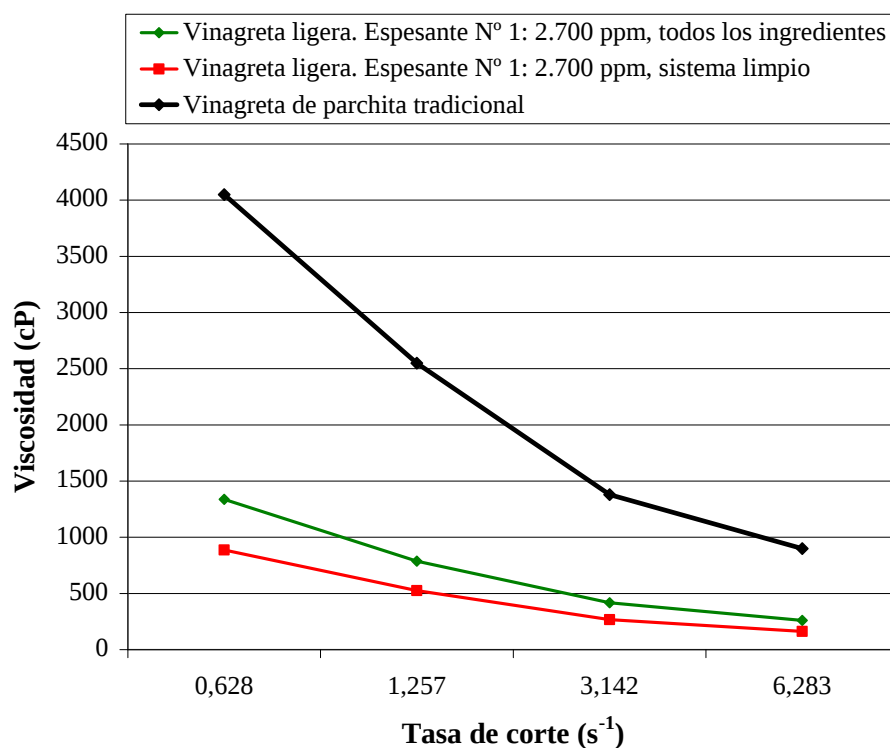


Gráfico N° 15: Comportamiento reológico de las muestras que contienen 2.700 ppm de l espesante N° 1, en limpio y con todos los ingredientes de la formulación; así como el de la vi nagreta tradicional.

Como era de esperarse, para el caso de las emulsiones correspondientes a la vinagreta ligera (menor contenido de aceite), la muestra que contenía pulpa de parchita en su formulación presenta una mayor viscosidad para todas las tasas d e corte evaluadas, respecto a aquella que fue preparada en limpio. Esto se debe a la presencia de partículas sólidas de tamaño considerable en la pulpa de parchita, las cuales aumentan la viscosidad de la muestra. En el caso de la vinagreta ligera de parch ita, esto no representa problema alguno, ya que en general se busca aumentar su viscosidad de forma tal que sea lo más parecida posible a aquella de la vinagreta tradicional.

A pesar de que la muestra preparada con pulpa de parchita tiene una mayor viscosidad que aquella del sistema limpio, todavía es mucho menor que la viscosidad de la vinagreta tradicional, por esto se evalúa el desempeño de l espesante N° 1 a una concentración mayor. Los resultados obtenidos se presentan a continuación, en el gráfico N° 16.

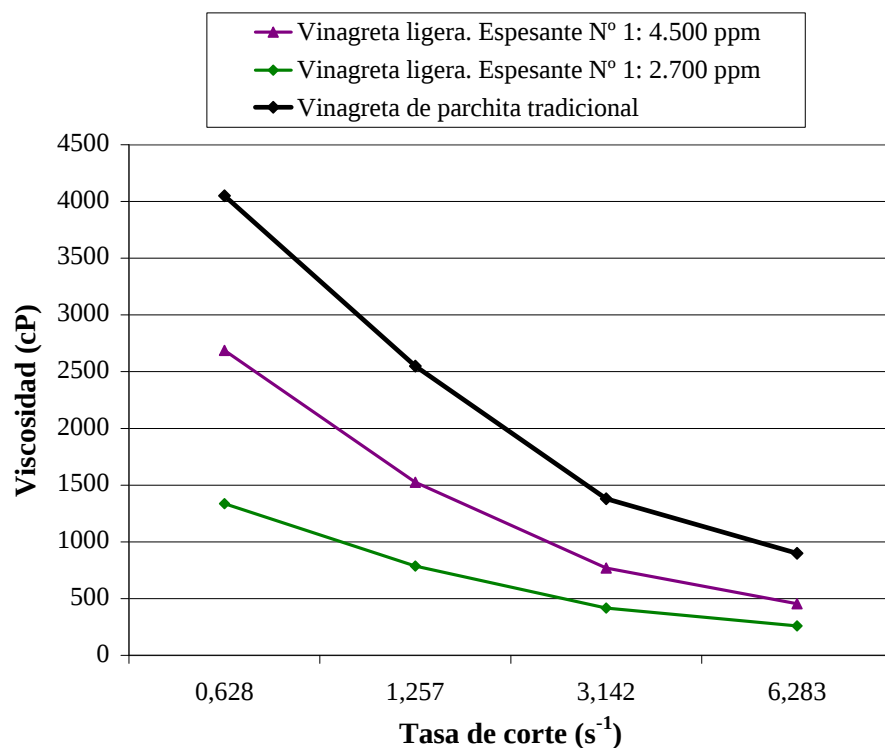


Gráfico N° 16: Comportamiento reológico de las muestras que contienen 2.700 ppm y 4.500 ppm de l espesante N° 1, así como el de la vinagreta tradicional.

Puede observarse que el comportamiento reológico de las dos muestras es bastante similar, pero con valores de viscosidad significativamente mayores para el caso en que se utilizaron 4.500 ppm de espesante. En este caso, es importante destacar la propiedad espesante de este aditivo que, a bajas concentraciones, es capaz de conferir una alta viscosidad a la solución a la que es añadida. Por esto, este aditivo es ampliamente utilizado en la industria de alimentos, con especial frecuencia en los aderezos para ensaladas y los productos bajos en calorías. ⁽³⁴⁾

Es importante destacar que fue realizada una prueba de sabor para la muestra de vinagreta ligera con 4.500 ppm del espesante N° 1, donde se obtuvo que sigue siendo el mismo a pesar del aumento en la concentración de aditivo. Además, para esta concentración se mejora mucho más la viscosidad, siendo más cercana a la de la vinagreta tradicional.

En la evaluación de aditivos espesantes de forma individual, también fue preparada una muestra que contenía una concentración de 2.700 ppm de l espesante N° 2 como único aditivo; sin embargo, su viscosidad no fue medida, porque a pocos días de su preparación presentaba una fase acuosa separada en el fondo. Esto hace descartar la utilización de este aditivo de forma individual, ya que no es compatible con el tipo de sistemas con los que se trabajó en este estudio.

Para finalizar con el análisis del efecto de la concentración y tipo de espesante se presentan, en el gráfico N° 17, los resultados obtenidos para las muestras que contenían el espesante N° 1 junto con otro aditivo.

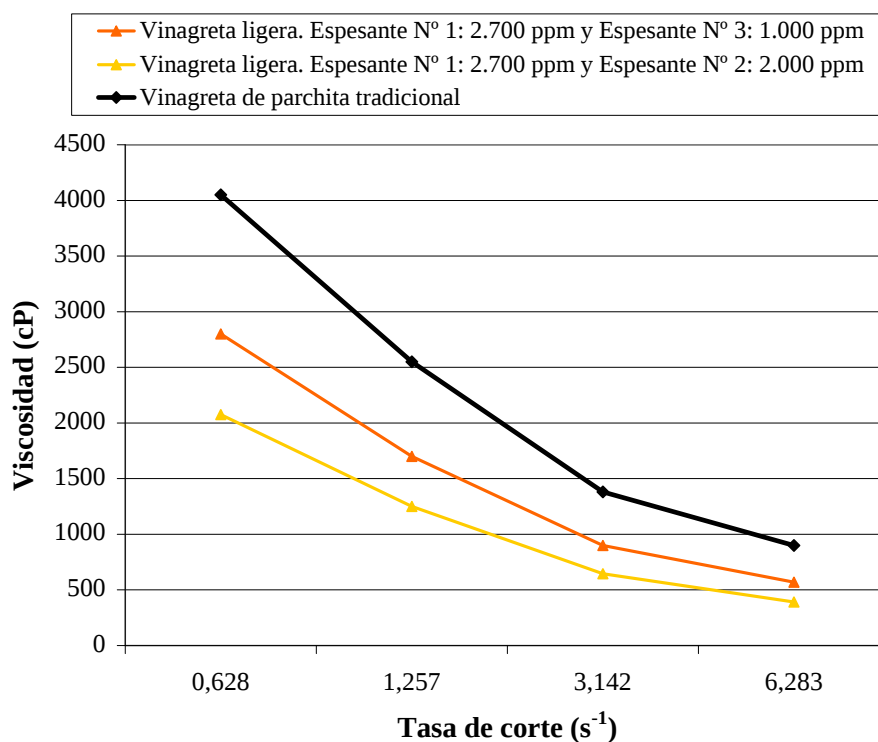


Gráfico N° 17: Comportamiento reológico de las muestras que contienen 2.700 ppm de l espesante N° 1, en sinergia con los espesantes N° 2 y N° 3, así como el de la vinagreta tradicional.

Nuevamente puede observarse que los resultados obtenidos al trabajar con el espesante N° 2 no son satisfactorios, ya que al usarlo junto con el espesante N° 1, la concentración total de aditivos es de 4.700 ppm y se obtiene una menor viscosidad

que la del sistema que contiene los espesantes N° 1 y N° 3, donde la concentración total de aditivos es de 3.700 ppm.

Conviene entonces comparar los sistemas para los que se obtuvieron las viscosidades más cercanas a aquella de la vinagreta tradicional; esto es, comparar la utilización de 4.500 ppm del espesante N° 1 con la combinación de este mismo aditivo junto con el espesante N° 3, para una concentración total de 3.700 ppm. Desde el punto de vista de la viscosidad del producto, ambas opciones son recomendables; sin embargo, como el espesante N° 1 es frecuentemente utilizado como único aditivo en aderezos para ensaladas y productos ligeros, se recomienda iniciar operaciones utilizando lo a una concentración de 4.500 ppm. Además, la empresa posee experiencia utilizando este aditivo y se ha comprobado que tiene una baja influencia sobre las propiedades organolépticas y la estabilidad en el tiempo de los productos.

De igual forma, se recomienda hacer más pruebas acerca de la utilización de la combinación sinérgica de los espesantes N° 1 y N° 3, que permitan evaluar la influencia de la presencia de estos dos aditivos en conjunto sobre las propiedades organolépticas y estabilidad en el tiempo de la vinagreta ligera.

Es importante destacar que la utilización de una concentración de 4.500 ppm del espesante N° 1 como único aditivo, se encuentra dentro de los valores permitidos para este tipo de alimentos. Su utilización proporciona al producto un comportamiento pseudo-plástico adecuado, que permite al consumidor sentir una viscosidad alta cuando introduce el alimento en su boca, pero a medida que comienza a masticar, la viscosidad de la vinagreta disminuye, debido a que se aumenta la tasa de corte. ⁽⁹⁾ Además, fue comprobado que la utilización de 4.500 ppm del espesante N° 1 no modifica el sabor de la vinagreta ligera de parchita.

Pruebas Tipo IV: Estabilidad en el Tiempo

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al evaluar la estabilidad estática en el tiempo de la vinagreta ligera de parchita durante un período de seis meses. Esta evaluación fue realizada para dos diferentes producciones de la empresa.

Producción N° 1

En primer lugar se presentan los resultados obtenidos para una producción de vinagreta ligera, en la cual la emulsión concentrada fue preparada con pulpa de parchita, aceite, surfactante y mostaza; para luego en la etapa de dilución incorporar el resto de los ingredientes. En este caso, la única propiedad medida en el período de estudio fue la distribución de tamaño de gota, los resultados obtenidos en las evaluaciones mensuales son mostrados a continuación en el gráfico N° 18.

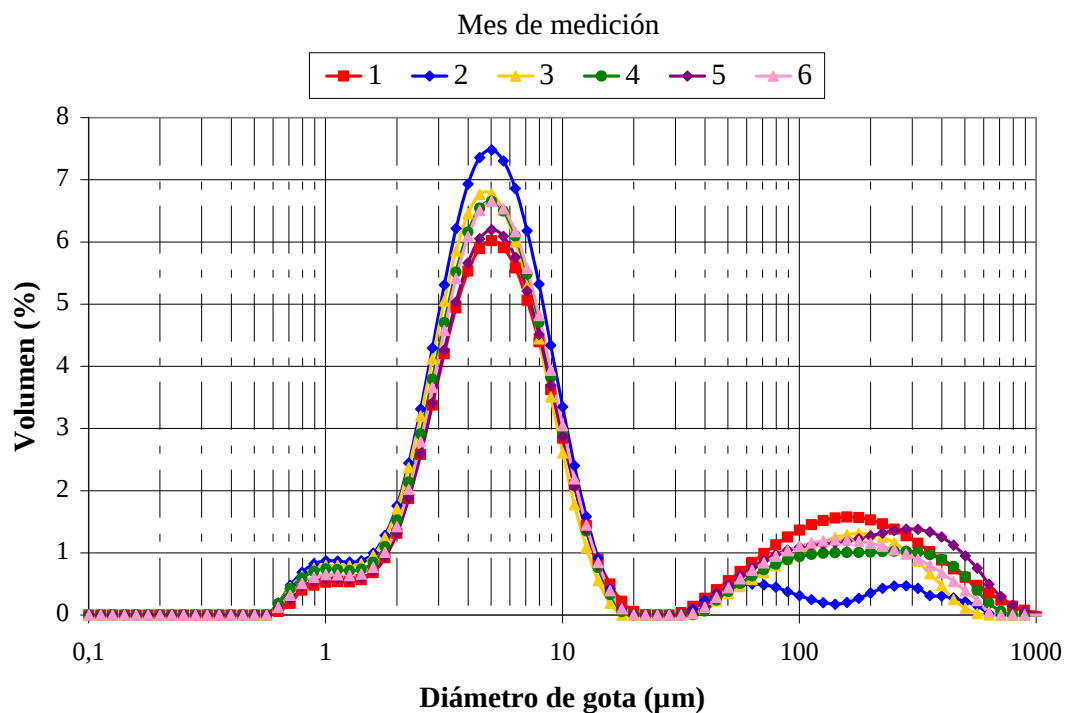


Gráfico N° 18: Variación de la distribución de tamaño de gota de la producción N° 1 en el tiempo.

Puede apreciarse, que la distribución de tamaño de gota de la vinagreta ligera fue bimodal, manteniendo a lo largo del tiempo una moda alrededor de 5 micras y otra

alrededor de 100 micras. Es de suponer que la moda de mayor tamaño está definida por la presencia de partículas sólidas asociadas a la pulpa de parchita, siendo entonces la moda alrededor de 5 micras determinada por las gotas de aceite presentes en la vinagreta.

Para describir completamente el comportamiento del tamaño de gota de esta emulsión en el tiempo, se presentan, en la tabla N° 13, los datos de diámetro de gota promedio en volumen y span, asociados a las distribuciones anteriores.

Tabla N° 13: Valores de D [4, 3] y span asociados a las distribuciones de tamaño de gota de la producción N° 1 en el tiempo.

	Mes de medición					
	1	2	3	4	5	6
D [4, 3] (μm)	57,047	18,940	34,836	43,254	61,754	39,671
Span (10% - 90%)	32,369	6,822	26,958	29,417	39,968	25,942

Puede apreciarse, que el D [4, 3] no sigue ninguna tendencia en específico, ya que presenta tanto aumento como disminución a lo largo del período de tiempo evaluado. Sin embargo, es posible afirmar que el rango de valores es alto, siendo esto de gran relevancia, ya que pudiese afectar la estabilidad del producto en el tiempo. ⁽¹⁴⁾ A pesar de esto, no se observaron cambios significativos a simple vista en la vinagreta durante su evaluación en el tiempo; las propiedades organolépticas permanecieron constantes y tampoco se observó separación de fases. Pudiera pensarse entonces que la presencia de partículas sólidas (asociadas a la pulpa de parchita) desplaza los valores de diámetro de gota promedio hacia valores más altos, sin que esto signifique que el tamaño de las gotas de aceite presentes sea alto.

En cuanto a la extensión de las distribuciones (span) se observa también dispersión de los datos, siendo valores altos que indican curvas anchas. Nuevamente, la influencia de la presencia de partículas sólidas de pulpa, pudiera aumentar estos valores sin

determinar directamente la estabilidad de la emulsión, ya que en el período de tiempo evaluado no se observó separación de fases.

A continuación se presentan los valores del diámetro de gota promedio en volumen de forma gráfica, para apreciar de una forma más clara la tendencia de los datos y complementar el análisis asociado.

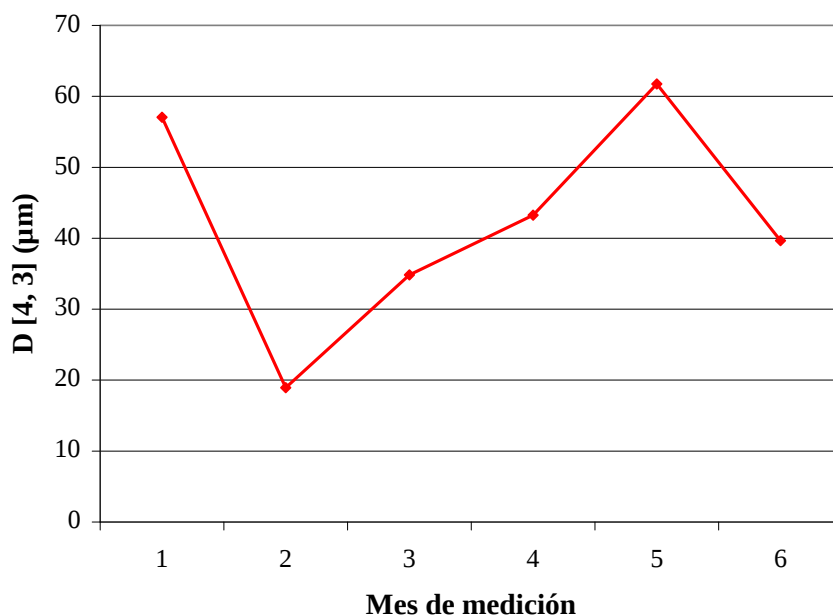


Gráfico N° 19: Variación del diámetro de gota promedio en volumen de la producción N° 1 en el tiempo.

Los diámetros de gota promedio en volumen medidos durante el período de tiempo de seis meses indican que la vinagreta es heterogénea, ya que inclusive en las mediciones de cada mes se observaron diferencias significativas dependiendo de la alícuota tomada para la medición. En este caso, el rango de variación del D [4, 3] es muy amplio, de aproximadamente 40 micras, ya que se tiene un mínimo cercano a 20 micras (segundo mes) y un máximo alrededor de 60 micras (quinto mes). Esto puede estar asociado a la inclusión de mostaza en la formación de la emulsión concentrada que, como ya fue mencionado anteriormente, tiene un efecto de aumento en la cantidad de fase acuosa que altera las propiedades de la emulsión final. Por esto,

puede afirmarse una vez más que no conviene incluir la mostaza durante la formación de la emulsión concentrada.

Producción N° 2

En el caso de la segunda producción de vinagreta ligera evaluada, la emulsión concentrada fue preparada únicamente con agua, aceite y surfactante; para luego en la etapa de dilución incorporar el resto de los ingredientes. En este caso, se determinó tanto la distribución de tamaño de gota como la viscosidad, durante el período de tiempo de estudio que, igual que en el caso anterior, fue de seis meses.

A continuación, en el gráfico N° 20, se muestran los resultados obtenidos de distribución de tamaño de gota de la producción N° 2.

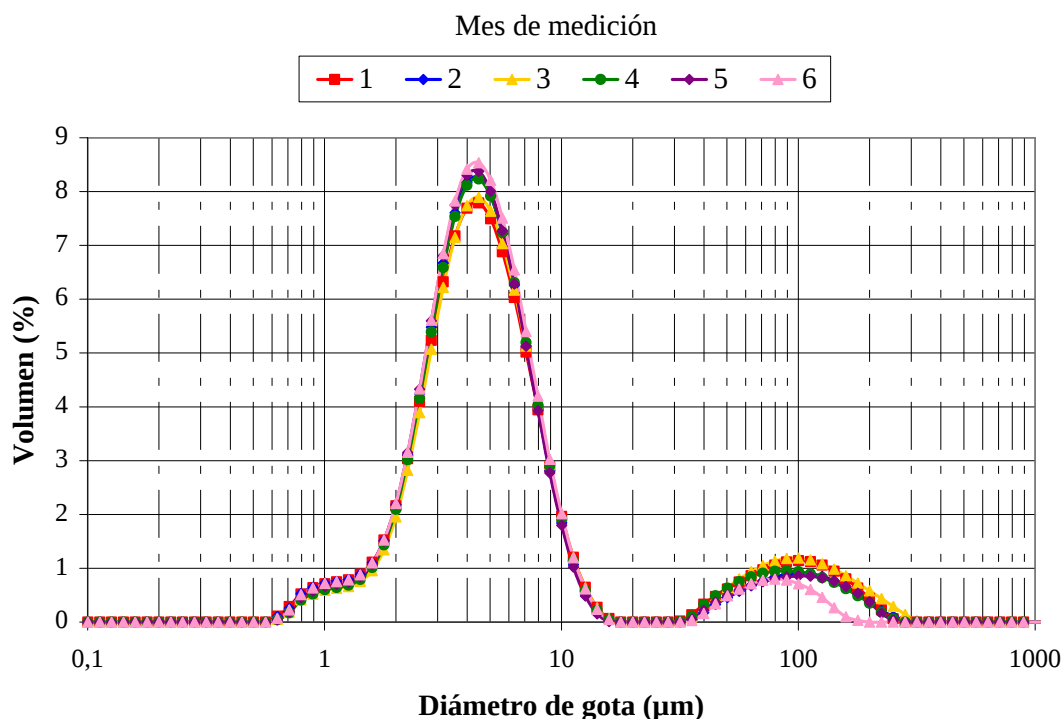


Gráfico N° 20: Variación de la distribución de tamaño de gota de la producción N° 2 en el tiempo.

Al igual que en la producción N° 1, se observan dos modas definidas, una alrededor de 4 micras y otra alrededor de 100 micras. En este caso, las distribuciones de tamaño

son muy similares a lo largo del período de tiempo evaluado, excepto por la disminución de la moda de mayor tamaño en el sexto mes; esto que indica un producto con una muy buena estabilidad en el tiempo, ya que esta propiedad permaneció prácticamente constante durante seis meses. Respecto a la distribución de tamaños de la producción N° 1, la moda alrededor de 100 micras en este caso es mucho menos ancha y abarca diámetros de gota menores. Puede suponerse, de igual forma que en la primera producción, que las dos modas están definidas por la presencia de gotas de aceite (4 micras) y por las partículas sólidas asociadas a la pulpa (100 micras).

A continuación, en la tabla N° 14, se presentan los datos de diámetro de gota promedio en volumen y span, asociados a la producción N° 2.

Tabla N° 14: Valores de D [4, 3] y span asociados a las distribuciones de tamaño de gota de la producción N° 2 en el tiempo.

	Mes de medición					
	1	2	3	4	5	6
D [4, 3] (µm)	16,377	14,187	18,745	14,416	13,733	14,152
Span (10% - 90%)	13,088	6,497	14,788	8,472	6,258	1,749

Puede apreciarse, que el D [4, 3] es mucho menor que en el caso de la primera producción, esto debido a que la moda de mayor tamaño es menos ancha y abarca diámetros menores, como ya fue mencionado. Esto indica nuevamente que se tiene una vinagreta con una mejor estabilidad en el tiempo, además tampoco se observaron cambios en sus propiedades organolépticas ni separación de fases durante el período en el que fue evaluada. Esta diferencia en el rango de valores de diámetro promedio entre las dos producciones evaluadas, muy probablemente está relacionada con la inclusión de la mostaza en la primera producción, lo que altera la relación volumétrica de fases y, por lo tanto, se obtienen diámetros de gota mucho mayores respecto al caso donde este ingrediente no fue incorporado en la etapa concentrada (segunda producción).

En cuanto a la extensión de las distribuciones de tamaño de esta segunda producción, se observan también valores mucho menores que en el primer caso porque, como ya se mencionó, la moda alrededor de 100 micras es mucho menos ancha para esta segunda producción.

A continuación, se presenta la variación del $D[4, 3]$ de forma gráfica, para el caso de la producción N° 2.

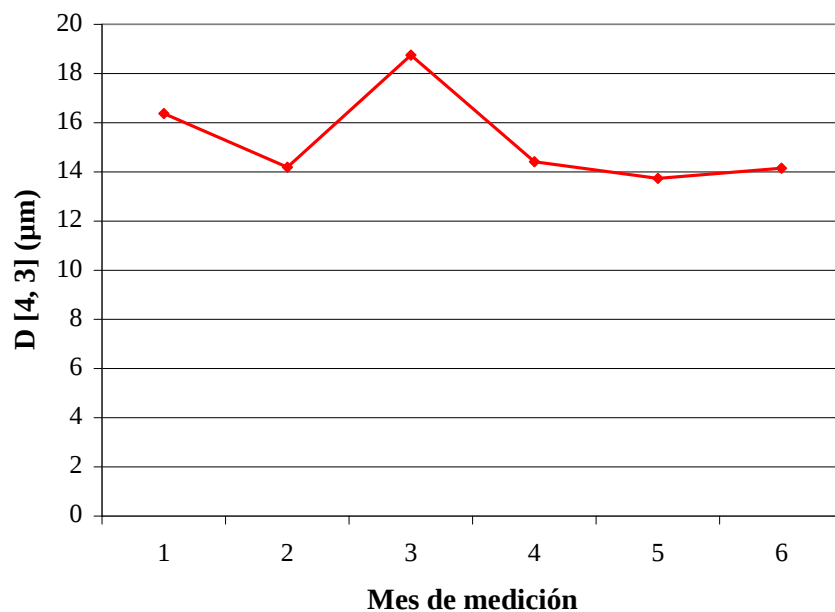


Gráfico N° 21: Variación del diámetro de gota promedio en volumen de la producción N° 2 en el tiempo.

Los diámetros de gota promedio en volumen medidos durante el período de tiempo de seis meses indican que la vinagreta ligera de la producción N° 2 es mucho más homogénea que la asociada a la producción anterior. En este caso, el rango de variación del $D[4, 3]$ es mucho menos amplio, siendo de aproximadamente 5 micras, con el mínimo cercano a 14 micras (quinto mes) y el máximo alrededor de 19 micras (tercer mes).

Por todos los resultados de distribuciones de tamaño y diámetro de gota promedio analizados en esta sección, puede afirmarse que la segunda producción de vinagreta ligera de parchita evaluada presentó una mejor estabilidad en el tiempo, ya que sus propiedades fueron menos variables que aquellas de la primera producción. Esto se traduce en que no es conveniente incluir la mostaza en la etapa concentrada de las producciones ya que, a pesar de que en un período de seis meses no conduce a la separación de fases, si afecta la homogeneidad del producto y el mantenimiento del diámetro de gota promedio en el tiempo.

Para finalizar la evaluación de la estabilidad en el tiempo de la vinagreta de parchita ligera, se presentan a continuación los resultados del comportamiento reológico de la vinagreta asociada a la producción N° 2.

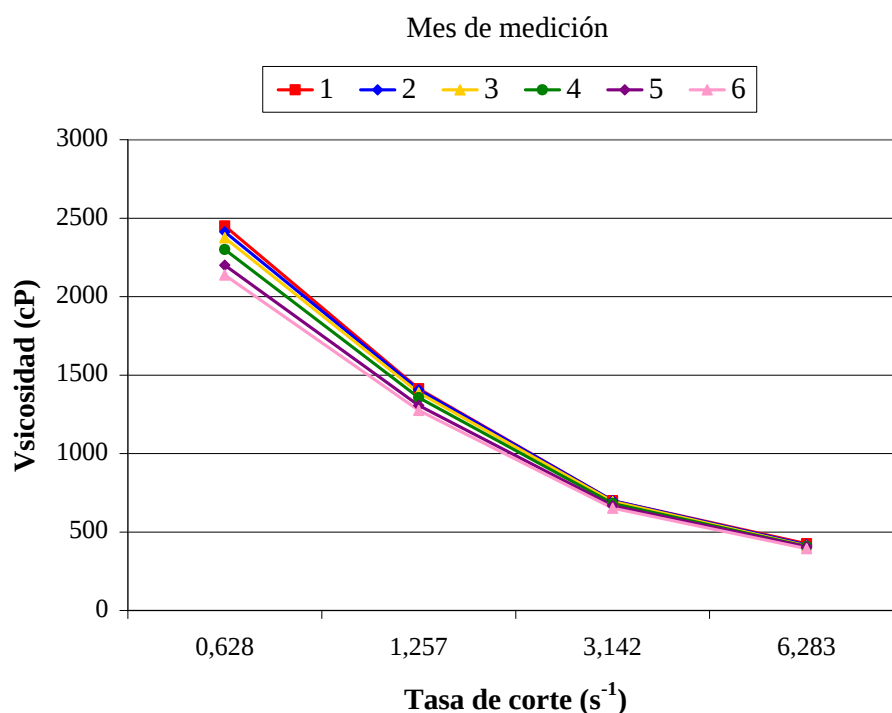


Gráfico N° 22: Comportamiento reológico de la vinagreta de parchita ligera en el tiempo (producción N° 2).

La viscosidad de la vinagreta, a las diferentes tasas de corte, permanece prácticamente constante, con una ligera disminución a medida que transcurre el tiempo, por lo que nuevamente se puede afirmar que la vinagreta asociada a la producción N° 2 tiene una adecuada estabilidad en el tiempo.

La ligera disminución en la viscosidad de la vinagreta, no puede atribuirse a posibles cambios en las propiedades de la emulsión ya que, como se observó en los resultados anteriores, la vinagreta es estable en términos de la distribución de tamaño de gota y diámetro promedio. Se recomienda realizar una evaluación de la viscosidad de la vinagreta por un período de tiempo mayor, de aproximadamente 1 año, y en caso de que la disminución de la viscosidad se haga más importante, se debe evaluar la efectividad de los aditivos espesantes en el tiempo.

Pruebas Tipo V: Mezclado

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos en las experiencias realizadas para evaluar la influencia de algunos parámetros de mezclado sobre las características de la emulsión concentrada, específicamente sobre la distribución de tamaño de gota. Es importante destacar que la selección del equipo de mezclado (escala de laboratorio) fue realizada en función del mezclador empleado actualmente en la empresa Orinoquia para la manufactura de la vinagreta ligera de parchita (ver anexo N° 9).

Barrido de velocidad de agitación

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos para el barrido de velocidad de agitación, donde se formaron emulsiones para un tiempo total de agitación de 4 minutos, utilizando un impulsor del tipo estator-rotor y una configuración geometría fija. A continuación, en el gráfico N° 23, se presentan las distribuciones de tamaño de gota obtenidas en esta primera etapa.

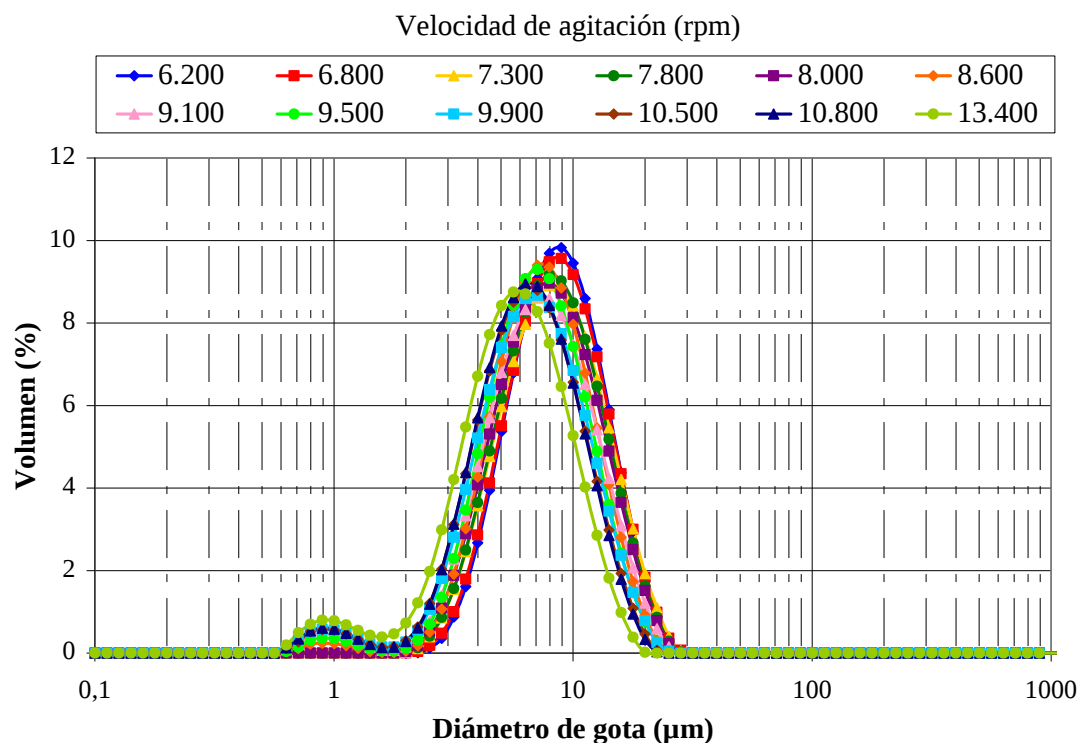


Gráfico N° 23: Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión respecto a la velocidad de agitación.

En el gráfico anterior puede apreciarse, un desplazamiento de las curvas de distribución hacia valores de tamaño de gota menores, a medida que aumenta la velocidad de agitación. Se observan distribuciones unimodales hasta una velocidad de 8.000 rpm, luego a partir de 8.600 rpm se aprecia una tendencia de formación de una segunda moda alrededor de 1 micra, la cual va creciendo a medida que se continúa aumentando la velocidad de agitación. Esto concuerda con lo descrito por la teoría, ya que al estar sometida la mezcla a un cizallamiento mayor, se producen más rupturas de las gotas de aceite y como se tienen moléculas de surfactante todavía disponibles, se estabilizan rápidamente estas gotas de tamaño menor. ⁽³²⁾

A continuación, se presenta en el gráfico N° 24, la variación del diámetro de gota promedio en volumen respecto a la velocidad de agitación con la cual se formó la emulsión.

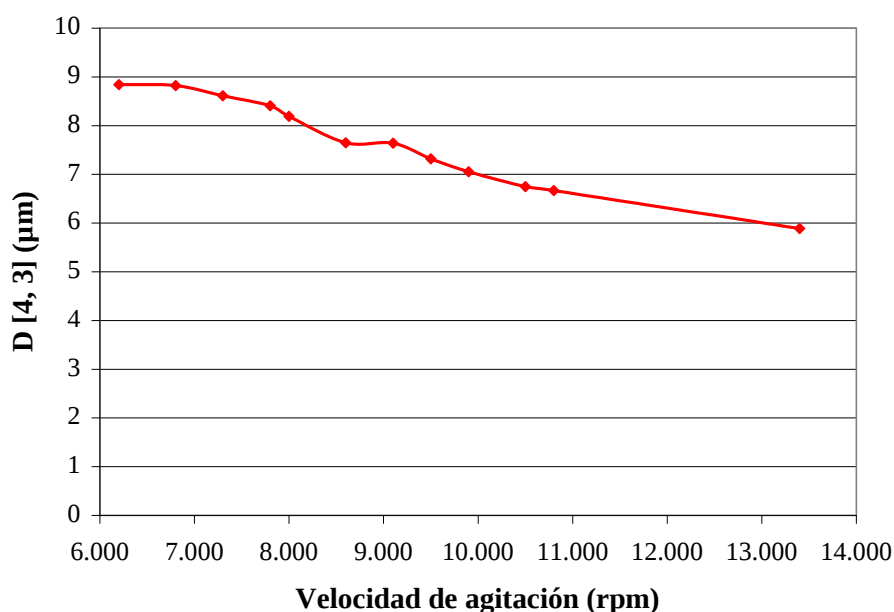


Gráfico N° 24: Variación del diámetro de gota promedio en volumen de la emulsión respecto a la velocidad de agitación.

Puede observarse una tendencia prácticamente lineal de disminución en el diámetro promedio a medida que aumenta la velocidad de agitación. Para el valor asociado a 8.600 rpm, se observa una disminución un poco más pronunciada que en el resto de los datos, esto se debe a la aparición de la moda de 1 micra, lo que influye sobre el valor de diámetro de gota promedio. En general, se obtuvieron diámetros de gota bajos que permiten la producción de emulsiones estables; sin embargo, debería evaluarse que ocurre a velocidades de agitación menores, así como también la influencia de la etapa de dilución sobre las emulsiones formadas para las diferentes velocidades.

Se selecciona la velocidad de 8.000 rpm para realizar las pruebas siguientes, ya que es un valor intermedio de velocidad para el cual se obtiene una adecuada distribución de tamaños; además, se necesita una velocidad de agitación intermedia para poder evaluar el efecto de las otras variables asociadas al mezclado, ya que si se utilizase una velocidad de agitación donde el mezclado fuese demasiado intensivo, esto podría

anular la influencia de las otras variables, ya que siempre se obtendrían emulsiones con distribuciones de tamaño similares.

Barrido de tiempo de agitación

Una vez evaluada la influencia de la velocidad de agitación sobre la distribución de tamaño de gota de la emulsión, se procede a realizar un barrido de tiempos de agitación, esto es, evaluar cómo cambia la distribución de tamaño de gota a medida que transcurre el tiempo de agitación. Esto fue realizado para una velocidad de agitación de 8.000 rpm, utilizando el mismo impulsor y configuración geométrica que en la etapa anterior (barrido de velocidad).

Es importante destacar, que durante los primeros 2 minutos de agitación no se tomaron muestras de emulsión, ya que durante este tiempo el impulsor se encuentra ubicado en el fondo del recipiente y todavía se tiene demasiado aceite sin dispersar (ver sección Plan de experiencias del capítulo III, p. 83). Los resultados de distribuciones de tamaño de gota obtenidos se presentan a continuación en el gráfico N° 25.

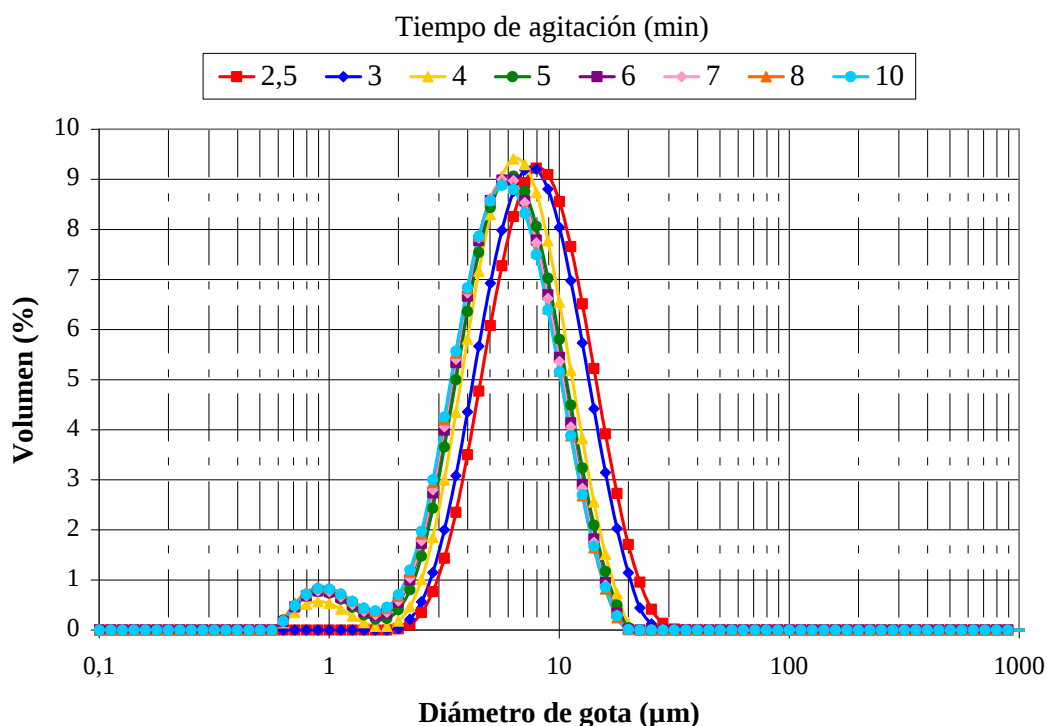


Gráfico N° 25: Variación de la distribución de tamaño de gota de la emulsión respecto al tiempo o de agitación.

Nuevamente se observa que, para tiempos de mezclado bajos (hasta 3 minutos), se obtienen distribuciones de tamaño unimodales, luego de 4 minutos de agitación en adelante, se comienza a formar una moda de tamaño menor (1 micra), la cual es indicio de que se tiene una emulsión de mayor estabilidad, respecto aquellas que son completamente unimodales. A continuación, en el gráfico N° 26, se presenta gráficamente la variación del diámetro de gota promedio en volumen, respecto al tiempo de agitación.

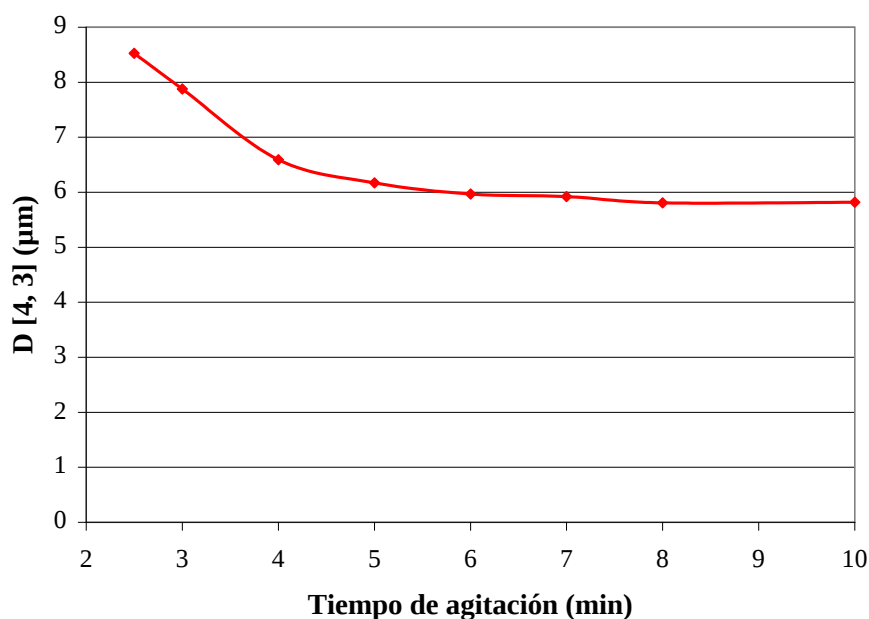


Gráfico N° 26: Variación del diámetro de gota promedio en volumen de la emulsión respecto al tiempo de agitación.

Puede apreciarse una disminución pronunciada en el diámetro promedio para los primeros minutos de agitación, luego éste tiende a ser constante a partir de un tiempo de agitación de aproximadamente 6 minutos. Esto indica, que agitar durante tiempos mayores a 6 minutos, representa un gasto energético innecesario, ya que el diámetro de gota promedio permanecería prácticamente constante. Por esto, se selecciona un tiempo de 6 minutos de agitación para continuar con las experiencias asociadas a la evaluación de los parámetros de mezclado.

Es importante destacar que todas las conclusiones de este estudio asociado a mezclado aplican siempre y cuando se utilice un impulsor del tipo estator-rotor similar al empleado en este caso, debiendo caracterizarse y escalarse cada una de las variables o parámetros de mezclado asociados al sistema. ⁽³⁷⁾ Por todo esto, para realizar la evaluación de diferentes configuraciones geométricas, se emplearon el mismo impulsor (estator-rotor), la misma velocidad de agitación (8.000 rpm) y el tiempo de mezclado seleccionado en esta etapa (6 minutos).

Efecto de la configuración geométrica

Por último, se procede a analizar el efecto de la configuración geométrica del sistema de mezclado utilizado sobre la distribución de tamaño de gota de la emulsión formada. A continuación, en la tabla N° 15, se presentan las dimensiones de los recipientes utilizados en estas experiencias.

Tabla N° 15: Dimensiones de los recipientes utilizados en el estudio del efecto de la configuración geométrica del sistema de mezclado.

	Recipiente	
	1	2
Diámetro (cm)	10	8
Altura (cm)	13,5	16,5

Utilizando estos dos recipientes, se prepararon cuatro emulsiones (identificadas como A, B, C y D) para diferentes cantidades de muestra, es decir, para diferentes alturas de líquido; esto con la finalidad de evaluar el efecto de algunas relaciones geométricas adimensionales del sistema, sobre la distribución de tamaño de gota y el diámetro de gota promedio. Las relaciones evaluadas se presentan a continuación en la tabla N° 16

Tabla N° 16: Relaciones geométricas evaluadas en el estudio del efecto de la configuración del sistema de mezclado, asociadas a las cuatro emulsiones preparadas.

Emulsión	Recipiente	Cantidad de muestra (g)	Relación geométrica	
			$\frac{h_L}{D_R}$	$\frac{D_i}{D_R}$
A	1	600	0,90	0,50
B	2	600	1,54	0,63
C	2	500	1,34	0,63
D	2	400	1,13	0,63

Donde: h_L es la altura de líquido, D_i el diámetro del impulsor y D_R el diámetro del recipiente.

La relación entre la altura del impulsor y la altura de líquido, fue constante en el caso de todas las emulsiones preparadas; no fue posible evaluar diferentes valores para esta relación debido al protocolo de mezcla que se debía seguir, esto es, 2 minutos de agitación con el impulsor muy cercano al fondo y luego los 4 minutos restantes se colocaba el impulsor a una altura equivalente al 78% de la altura de líquido (según el caso). Este protocolo se sigue con la finalidad de obtener una emulsión del tipo O/W y para poder dispersar todo el aceite presente.

A continuación, en el gráfico N° 27, se muestran las distribuciones de tamaño de gota asociadas a las relaciones geométricas evaluadas.

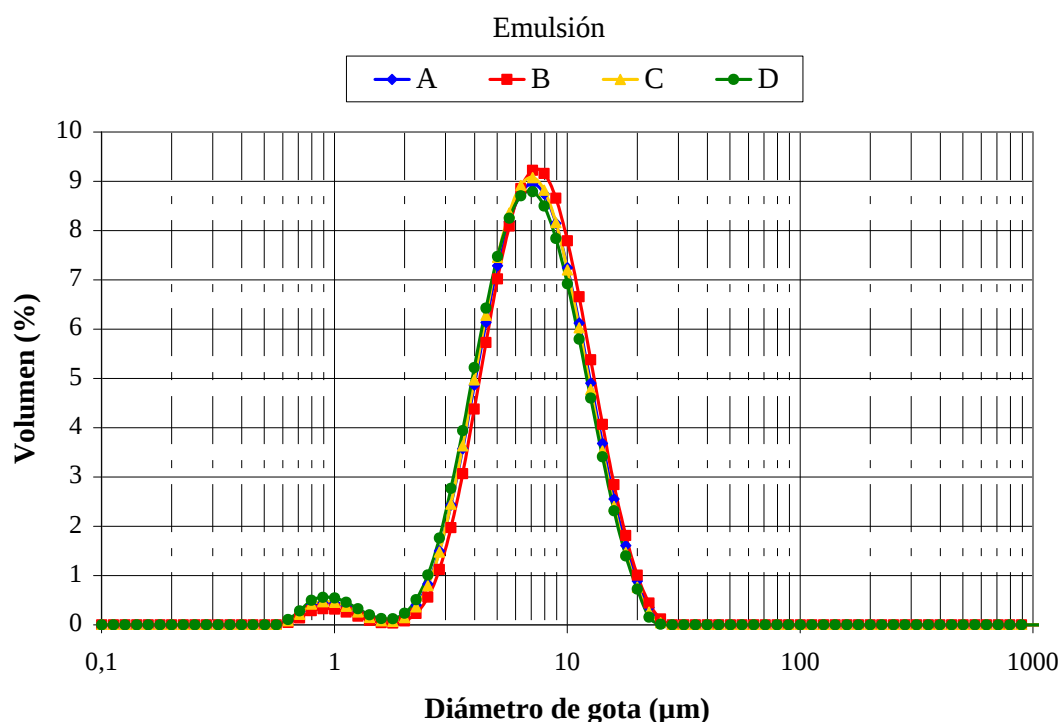


Gráfico N° 27: Variación de la distribución de tamaño de gota de las emulsiones, respecto a la configuración geométrica del sistema de mezclado.

Puede observarse, que las distribuciones de tamaño de gota son muy similares para las diferentes configuraciones geométricas evaluadas. En todos los casos, se observan distribuciones unimodales, con la moda ubicada alrededor de las 7 micras; además se

presenta una tendencia de formación de una segunda moda de aproximadamente 1 micra. También puede observarse que el ancho de las distribuciones en todos los casos es bastante similar.

A continuación, se presentan los valores de diámetro de gota promedio en volumen para las diferentes emulsiones preparadas en esta etapa.

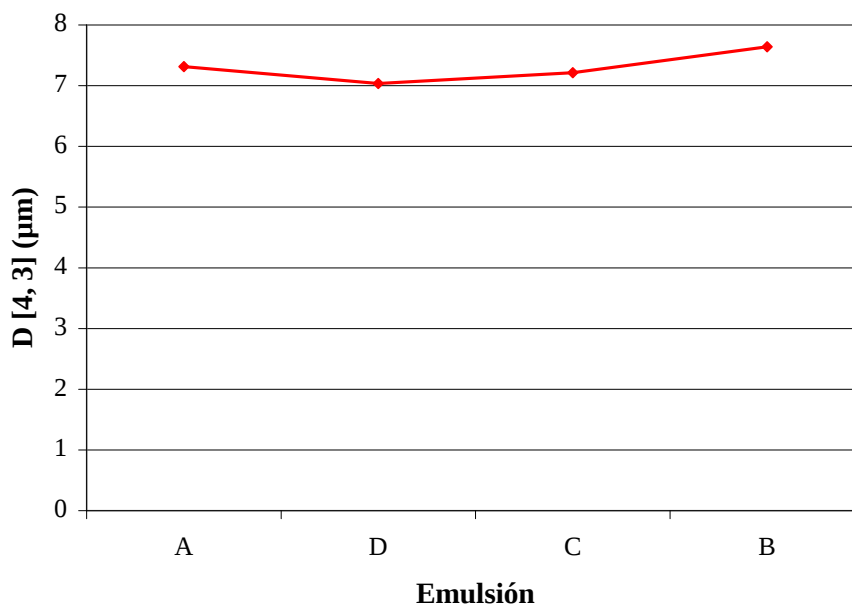


Gráfico N° 28: Variación del diámetro de gota promedio en volumen de las emulsiones, respecto a la configuración geométrica del sistema de mezclado.

El rango de variación en los diámetros promedio, para las configuraciones geométricas evaluadas, es menor a 1 micra; es posible afirmar entonces que no hay variación significativa en el diámetro de gota promedio. Sin embargo, puede observarse que la emulsión D es aquella cuyo diámetro promedio es menor; en ese caso se utilizó una relación de altura de líquido/diámetro del recipiente de 1,13 lo que concuerda con lo descrito en la bibliografía, donde recomiendan configuraciones donde la altura del líquido sea aproximadamente igual al diámetro del recipiente. ⁽⁴⁰⁾

En cuanto a la relación diámetro del impulsor/diámetro del recipiente, se tiene que al utilizar un impulsor del tipo estator-rotor, no se espera que el diámetro del recipiente tenga una influencia significativa sobre el tamaño de las gotas obtenidas, ya que el estator que rodea a la parte giratoria del impulsor encapsula al fluido haciendo que siempre esté sometido a valores altos de cizallamiento. Por todo esto, se puede indicar que la única influencia del diámetro del recipiente a nivel práctico (cuando se utiliza este tipo de impulsores), es que se haga más fácil incorporar todo el aceite a la emulsión; en otras palabras, a diámetros de recipiente menores se logra dispersar todo el aceite con más facilidad, respecto al caso de un recipiente de diámetro mayor; esto a pesar de que en ambos casos los diámetros de gota promedio obtenidos sean similares.

Cuando se emplean impulsores del tipo estator-rotor en la formación de una emulsión, es muy importante asegurar que todo el fluido pase a través de la zona de alto cizallamiento ubicada entre el estator y el rotor, con el fin de asegurar la dispersión de toda la fase interna en el seno de la externa. Esto se logra, no solo seleccionando el recipiente cuyo diámetro permita obtener una buena relación respecto al diámetro del impulsor, sino también proporcionando la energía de mezclado y el tiempo de residencia necesarios. Para alcanzar estas condiciones óptimas, son empleados deflectores y/o álabes con la finalidad de obligar al fluido a circular por las cercanías del impulsor y, en algunos casos, son necesarios dos o más impulsores.

En general, la similitud de los resultados para las configuraciones geométricas evaluadas puede deberse al hecho de que los diámetros de recipiente utilizados, así como las alturas de líquido, no eran lo suficientemente diferentes como para observar su efecto sobre la distribución de tamaños de gota y el diámetro de gota promedio. Además, ya se observó que la velocidad y tiempo de agitación empleados, permiten obtener bajos tamaños de gota en la emulsión; podría entonces ocurrir que el mezclado para todos los casos sea tan intensivo que independientemente de la

configuración geométrica del sistema, las distribuciones de tamaño de gota permanecerán constantes.



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta sección, se presentan las conclusiones del estudio y las recomendaciones sugeridas por el autor, luego de la realización de este Trabajo Especial de Grado.

Conclusiones

1. El diámetro de gota promedio de la emulsión concentrada disminuye a medida que aumenta la concentración de surfactante comercial. La concentración óptima de surfactante comercial (no iónico) para el caso de la vinagreta ligera de parchita, debe ser un valor que equilibre la distribución de tamaños de gota, la estabilidad de la emulsión en el tiempo y los costos de manufactura.
2. En la formación de emulsiones concentradas no se observaron variaciones de los valores de diámetro de gota para concentraciones de mostaza entre 2 y 10 %. Los valores obtenidos para todos los casos están alrededor de 100 micras.
3. Las emulsiones preparadas con concentraciones de mostaza del 2 y 4 % no fueron estables en el tiempo.
4. Incluir la mostaza durante la etapa concentrada en el proceso de elaboración de la vinagreta ligera, conlleva a una alteración en la relación volumétrica de fases y, por lo tanto, afecta las propiedades del producto. No conviene incluir la mostaza en la formulación de la emulsión concentrada durante la manufactura de la vinagreta ligera.
5. El diámetro de gota promedio de la emulsión concentrada disminuye a medida que aumenta la concentración de yema de huevo. La variación en el diámetro de gota promedio de la emulsión concentrada es significativa, para pequeñas variaciones en la concentración de yema de huevo.
6. Para obtener diámetros de gota similares a los que se obtienen con el surfactante comercial cuando se utiliza yema de huevo como agente surfactante en la emulsión concentrada, se requieren cantidades tan altas que afectan las propiedades organolépticas y nutricionales del producto final.

7. La presencia de partículas en la pulpa de parchita, influye sobre la medición de la distribución de tamaño de gota de la emulsión, desplazando los valores de diámetro de gota promedio hacia valores mayores; este fenómeno no debe confundirse con la coalescencia de las gotas de aceite.
8. La vinagreta ligera de parchita posee un comportamiento reológico del tipo pseudo-plástico, determinado por la presencia de aditivos espesantes.
9. La utilización del espesante N° 2 como único aditivo, produce una separación de fase acuosa en la vinagreta ligera.
10. La combinación sinérgica de los espesantes N° 1/N° 2 (2.700 ppm/1.000 ppm), confiere una viscosidad mayor en la vinagreta ligera que aquella asociada a la sinergia de los espesantes N° 1/N° 3 (2.700 ppm/2.000 ppm).
11. La utilización de 4.500 ppm del espesante N° 1 no modifica el sabor de la vinagreta ligera de parchita y le proporciona un comportamiento reológico similar al deseado.
12. En la producción de la vinagreta ligera de parchita con una concentración de surfactante de 8.000 ppm (base aceite), una relación aceite/agua de 80/20 y 4.500 ppm de espesante, se opera en una condición estable de proceso y se obtienen excelentes resultados de diámetro de gota y estabilidad durante los 6 meses evaluados.
13. El diámetro de gota promedio en volumen, asociado a la emulsión concentrada, sigue una tendencia prácticamente lineal respecto a la velocidad de agitación (mezclado) a la cual se forma la emulsión.
14. Para el sistema de mezclado evaluado, el diámetro de gota promedio de la emulsión permanece prácticamente constante para tiempos de agitación mayores a 6 minutos.
15. Cuando se emplean impulsores del tipo estator - rotor, el diámetro de gota promedio en volumen de la emulsión concentrada es prácticamente independiente de la configuración geométrica del sistema de mezclado.

Recomendaciones

1. Para el caso de la formación de la emulsión concentrada, durante la elaboración de la vinagreta ligera de parchita, se recomienda un tiempo de agitación de 10 minutos.
2. Con base a los resultados obtenidos, se recomienda utilizar únicamente el surfactante comercial como agente emulsificante de la emulsión concentrada.
3. Se recomienda utilizar una relación aceite/agua de 80/20 para la preparación de la emulsión concentrada durante la manufactura de la vinagreta ligera de parchita.
4. Se recomienda iniciar operaciones utilizando una concentración de 4.500 ppm del espesante N° 1, para la manufactura de la vinagreta ligera de parchita.
5. Se recomienda hacer más pruebas acerca de la utilización del espesante N° 1 en sinergia con el espesante N° 3, que permitan evaluar la influencia sobre las propiedades organolépticas y estabilidad en el tiempo de la vinagreta ligera.
6. Se recomienda hacer un estudio más detallado acerca de la influencia de los parámetros asociados al mezclado sobre la distribución de tamaños y diámetro de gota promedio de la emulsión concentrada.

REFERENCIAS

1. Schramm, L. (1992). Emulsions, Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry. Estados Unidos: Advances in Chemistry Series.
2. Castro, M. y otros. (s.f.). Efecto de la interacción Tween® 20 - sorbato de potasio en la estabilidad microbiológica de emulsiones alimenticias . [Documento en línea] Disponible: <http://www.unne.edu.ar/cyt/2001/8-Exactas/E-041.pdf>
3. Deis, R. (2002). Food Emulsions – Combining Immiscible Ingredients. [Documento en línea] Disponible: <http://www.foodproductdesign.com>
4. Castro, M. y otros. (s.f.). Interacciones entre ingredientes y su relación con la estabilidad microbiológica de aderezos para ensalada . [Documento en línea] Disponible: <http://www.unne.edu.ar/cyt/2002/08-Exactas/E-006.pdf>
5. Vinagretas: la importancia de un buen aliño. (2006). [Documento en línea] Disponible: <http://www.repsolypf.com/esp/bienvenidoalinfinito/casayhogarnuevo/cocina/reportajes/comerencasa/trucosyconsejos/trucosyconsejos.asp?PaginaID=84961&Nivel=3>
6. Aditivos alimentarios. (s.f.). [Documento en línea] Disponible: <http://www.eufic.org/web/article.asp?cust=1&lng=es&lowres=1&expid=11>
7. Clasificación general de los aditivos alimentarios . (s.f.). [Documento en línea] Disponible: <http://bioaplicaciones.galeon.com/aditgen.html>
8. ¿Para qué tantos aditivos? (s.f.). [Documento en línea] Disponible: <http://www.elc-eu.org/additsp.html>
9. Hegenbart, S. (1995). Controlling Viscosity in Dressings and Sauces. [Documento en línea] Disponible: <http://www.foodproductdesign.com>
10. CPKelco (s.f) Salad Dressings. Proporcionado por Cenco-Zotti Alimenticia S.A.
11. Salager, J. (1999). Cuaderno FIRP S747-B. Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para obtener las Propiedades deseadas. Estado del Arte. Parte B. Propiedades de las Emulsiones y su medición. Mérida,

Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.

12. Méndez, F. (1992). Estabilidad Dinámica de Emulsiones de Aceite en Agua. Trabajo especial de Grado en Ingeniería Química. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
13. Salager, J. (1999). Cuaderno FIRP S747-A. Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para obtener las Propiedades deseadas. Estado del Arte. Parte A. Introducción y Conceptos de Formulación Físico-química. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.
14. Miñana, M. (1982). Informe técnico FIRP N° 8201. Propiedades de los Sistemas Surfactante-Agua-Aceite Emulsionados: Influencia de la Formulación. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.
15. Salager, J. (1984). Informe técnico FIRP N° 8401. Micro y Macroemulsiones. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.
16. Becher, P. (1972). Emulsiones: Teoría y Práctica. 2^{da} edición. Madrid, España: Editorial Blume.
17. Reología de los sistemas dispersos. Emulsiones, suspensiones y dispersiones semisólidas. (s.f.). [Documento en línea] Disponible: http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias_quimicas_y_farmaceuticas/ap-fisquim-farm14/c21.html
18. Determinación de la Conductividad Eléctrica. (2005). [Documento en línea] Disponible: <http://www.members.tripod.com/Arturobola/conducti.htm>
19. Acuña, M. y Montes, G. (s.f.). Elementos introductorios sobre tensoactivos en solución y la fabricación de emulsiones. [Documento en línea] Disponible: <http://cabierta.uchile.cl/revista/26/articulos/pdf/edu4.pdf>

20. Peralta, M. y otros. (2001). Nueva tecnología para la emulsificación de residuales del petróleo en agua. [Documento en línea] Disponible: <http://www.iie.org.mx/2001c/tec1.pdf>
21. Salager, J. (1988). Cuaderno FIRP ESP*. Reología y Estabilidad de Emulsiones. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.
22. Rojas, O. (1988). Cuaderno FIRP 520. Introducción a la Reología. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.
23. Salager, J. y Fernández, A. (2004). Cuaderno FIRP N° 301-PP. Surfactantes Generalidades y Materias primas. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.
24. Salager, J. y Antón, R. (1992). Cuaderno FIRP N° 311-A. El Mundo de los Surfactantes. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.
25. Salager, J. (2002). Cuaderno FIRP N° 300-A. Surfactantes Tipos y Usos. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.
26. Heredia, P. (s.f.). Surfactantes [Documento en línea] Disponible: <http://www.monografias.com/trabajos14/tensoactivos/tensoactivos.shtml>
27. Salager, J. y Fernández, A. (2004). Cuaderno FIRP N° 302-PP. Surfactantes Aniónicos. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.
28. Fernández, A. y otros. (2004). Cuaderno FIRP N° 303-PP. Surfactantes Noiónicos. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.
29. Salager, J. y Fernández, A. (2004). Cuaderno FIRP N° 304-PP. Surfactantes Catiónicos y otros. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.

30. Salager, J. (2002). Cuaderno FIRP S122-N. Fenómenos Interfaciales en Dispersiones polifásicas y Medios porosos. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.
31. Wade, L. (1993). Química Orgánica. 2^{da} edición. México: Editorial Prentice Hall.
32. Salager, J. (1993). Cuaderno FIRP S201-A. Surfactantes en solución acuosa. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.
33. Efectos Espesantes, Gelificantes y Estabilizantes con Hidrocoides. (s.f.). [Documento en línea] Disponible: <http://www.alimentacion-sana.com.ar/informaciones/Chef/espesantes.htm>
34. Gelificantes, Espesantes, Estabilizantes, Emulsionantes . (2006). [Documento en línea] Disponible: <http://www.pasqualinonet.com.ar/Espesantes.htm>
35. Descripción de Hidrocoloides. (s.f.). [Documento en línea] Disponible: <http://www.provisco.com.ar/index.htm>
36. Basurto, L. (2001). Ficha técnica de la goma Tara. [Documento en línea] Disponible: <http://taninos.tripod.com/FichaTecnica.htm>
37. Potter, M. y otros. (1998). Mecánica de Fluidos. 2^{da} edición. México: Editorial Prentice Hall.
38. Shames, I. (1995). Mecánica de Fluidos. 3^{era} edición. Colombia: Editorial McGraw-Hill.
39. McCabe, W. y otros. (1991). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 4^{ta} edición. España: Editorial McGraw-Hill.
40. Walas, S. (1990). Chemical Process Equipment. Selection and Design. Estados Unidos: Butterworth-Heinemann.
41. Rojas, S. y otros. (s.f.). Evaluación del protocolo de mezcla en la estabilidad de una emulsión de aceite en agua. Caracas, Venezuela: Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia. Escuela de Ingeniería Química. Universidad Simón Bolívar.

42. Frequently Asked Questions. Malvern Instruments. (2006). [Documento en línea] Disponible : <http://www.malvern.co.uk/malvern/kbase.nsf/allbyno/KB000089?opendocument>
43. Salager, J. (1999). Cuaderno FIRP S747-C. Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para obtener las Propiedades deseadas. Estado del Arte. Parte C. Efectos de la Formulación. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.

ANEXOS

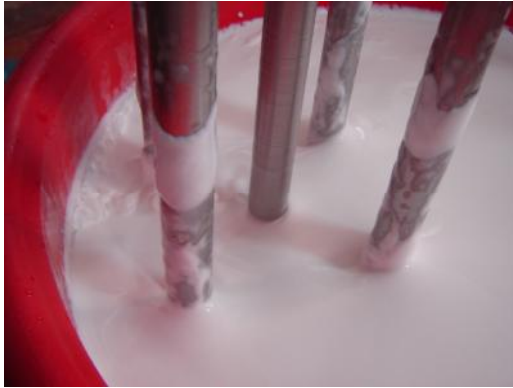
En esta sección se presenta el material complementario empleado durante la realización de este Trabajo Especial de Grado.

Anexo N° 1

Vinagreta de Parchita Ligera



Anexo N° 2
Emulsión Concentrada



Anexo N° 3
Etapa de Dilución



Anexo N° 4

Descripción del Equipo Malvern Mastersizer 2000

Tomado de: <http://www.malvern.co.uk>

Particle size



Mastersizer 2000



2000

Integrated systems for particle sizing

detailed specification sheets from www.malvern.co.uk/ms2000

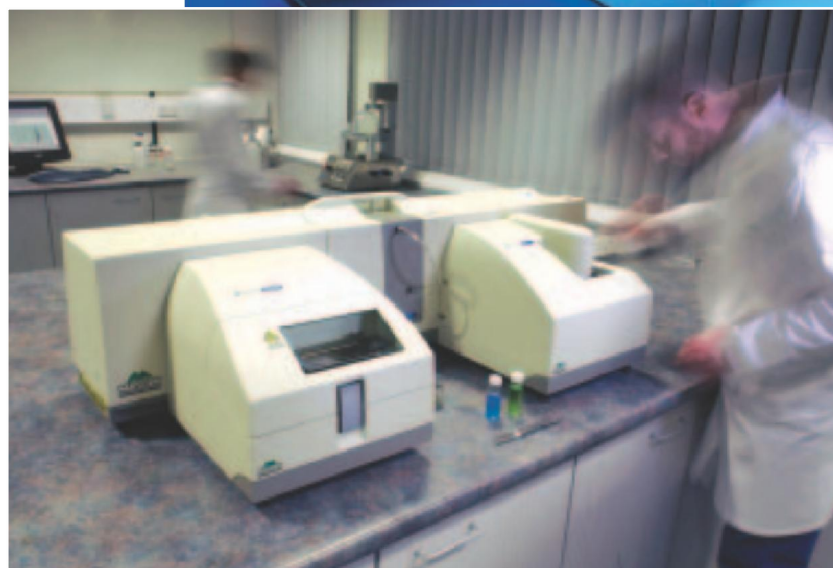


Comprehensive particle sizing

The Mastersizer 2000 is a practical, reliable solution to the everyday particle sizing needs of industry.

Driven by Standard Operating Procedures (SOPs), the system has set exacting standards in laser diffraction particle sizing.

The Mastersizer 2000 embodies a great deal of expertise and experience. It also comes with the assurance of Malvern's long history in particle sizing and the company's strong culture of customer-focused innovation.



“ The Malvern Mastersizer 2000 is the major workhorse for a range of applications involving suspensions and emulsions systems in our group.

Given these diverse requirements it represents a robust solution to particle sizing over a wide dynamic range.”

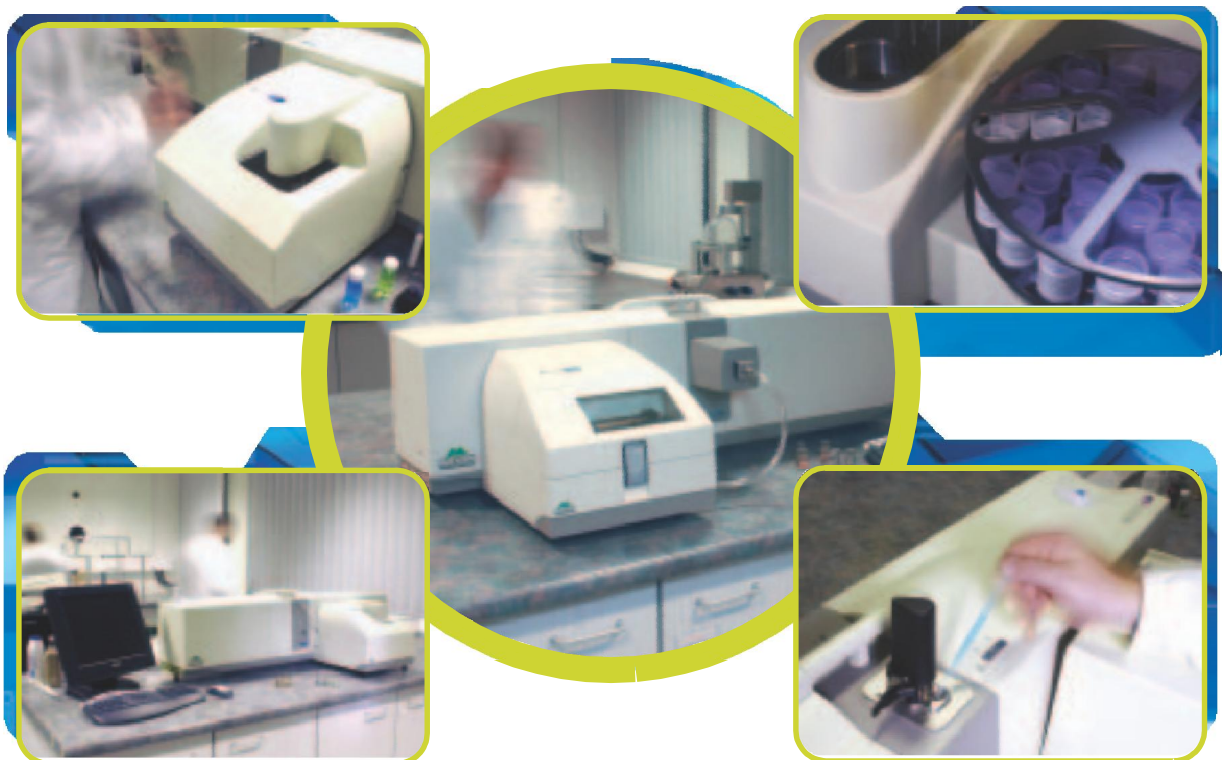
Richard Williams, Leeds University

It is a flexible and modular, but fully integrated, particle sizing system with assured measurement performance from submicron to millimetre, wet or dry, from milligram quantities of precious pharmaceuticals to the measurement of bulk chemicals and minerals.

Now proven in diverse applications throughout the world, the Mastersizer 2000 meets even the most stringent measurement and regulatory requirements. Yet it offers such simple, straightforward operation with clear result interpretation that anyone can use it.

An **integrated** approach

Malvern's systems approach to sample dispersion, instrument control and measurement has resulted in full automation and SOP-driven operation for the Mastersizer 2000, dramatically reducing the need for user intervention.



Not only does this remove a major source of measurement variability, it also makes the system especially easy to use – often requiring no more than single button operation.

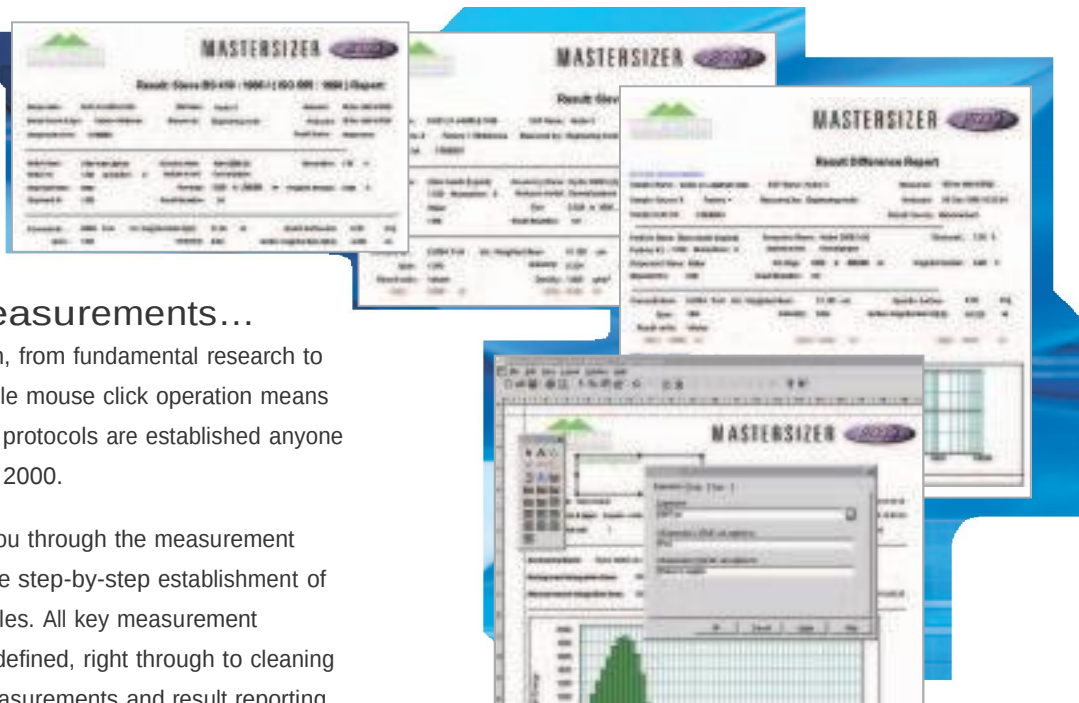
Software-controlled plug-and-play dispersion units deliver the optimal sample presentation necessary for the production of reliable, comparable, high-quality results time after time.

With such a high degree of standardization, global method transfer and method sharing become both viable and entirely straightforward.

- **SOP-driven for simple, consistent operation and reliable method transfer**
- **Full automation with software-driven control and data management**
- **'Plug-and-play' dispersion units for all sample types**
- **Automated control of dispersion for optimal sample presentation**
- **Wet or dry measurements, with simple changeover between sample types**
- **Wide dynamic range: 0.02 μ m - 2000 μ m**
- **Single button operation**
- **Wide application**

Measurements made simple

The Mastersizer 2000 has a friendly user interface – a simple gateway that allows access to all of the system functions and extensive analytical capabilities. The Mastersizer software provides control and management of all size measurement and data management tasks, guiding you at every stage with on-line help and advice.



Controlled measurements...

Whatever the application, from fundamental research to production control, simple mouse click operation means that once measurement protocols are established anyone can use the Mastersizer 2000.

Software wizards lead you through the measurement process, starting with the step-by-step establishment of SOP's for different samples. All key measurement parameters can be pre-defined, right through to cleaning procedures, multiple measurements and result reporting. Automated operation ensures everyone can be confident as they deal with a variety of sample types, interchange dispersion units and switch from one type of measurement to another.



For complete security, the software grants different privileges, enabling you to protect measurement procedures or allow specific individuals or groups more comprehensive access to the system.

...with meaningful results

Live displays allow the tracking of sample measurements in real time, allowing you to monitor all aspects of the measurement process. Result reporting is completely configurable, enabling you to define exactly what information is displayed by customizing screen views and printed reports. A wide variety of graphing functions includes trend graphs where outlying values are automatically highlighted. Customizable record pages permit at-a-glance comparison of key particle size parameters, ensuring consistent data management and reporting.

A simple, automated data export function enables full integration of particle sizing data with other analytical information.



Robust measurements

The versatility and wide dynamic range of the Mastersizer 2000 make it suitable for a diverse range of applications. Configuring the system for individual use is entirely straightforward, as is changing between different measurement types.

SOPs bring definition and consistency to measurements.

A simple software wizard guides the user through method definition, allowing the establishment of detailed SOPs for global adoption in minutes. Once established, SOPs can be saved and transferred by email to other Malvern systems.

SOP's can be used to determine:

- Dispersion unit type
- Dispersion settings
- Material to be measured, with optical properties
- Dispersant, with optical properties
- Measurement time
- Number of measurements per sample
- Calculation type
- Operator on-screen instructions
- Report format
- Labelling protocols
- Automation cycles

Method development made easy

The Mastersizer 2000's SOP function makes method development and transfer straightforward. Multiple SOPs can be developed on the same system and running the samples is reduced to single button operation. Method transferability assists not only large companies operating globally, but also in areas such as the standardization of materials specifications between supplier and customer.

Data representation in your hands

An integrated report designer enables you to customize what you see or print, allowing you the option to focus on critical parameters. Saving and exporting data then allows further analysis as required. A graph zooming facility for on-screen data allows the magnification of specific areas to give precise values and graphs can be cut and pasted into other applications. Special data calculations include Tromp curves, Rosin Rammler fits, Phi plots and tables. The definition of custom control parameters is also possible.

Qualified performance

A total quality approach is central to all Malvern Instruments' operations. The company has ISO9001:2000 with TickIT accreditation and is able to provide full traceability of changes in software and design. Naturally the Mastersizer 2000 also meets the rigorous quality and validation requirements demanded throughout modern industry.

Standardizing measurements

ISO13320-1 is the first formal international standard for particle size analysis by laser diffraction, providing a methodology for proper quality control. The standard offers advice on the expected capabilities and modelling requirements for diffraction systems as well as guidance on how reproducible measurements can be achieved. Within the Mastersizer 2000 system, consistent and controlled measurements are achieved through the clear specification of sample dispersion units and critical operating parameters within SOPs. With the automatic application of full Mie theory, the appropriate optical model is used whatever the size range being measured. This ensures method development and definition to ISO13320-1 guidelines.



Quality assurance standards

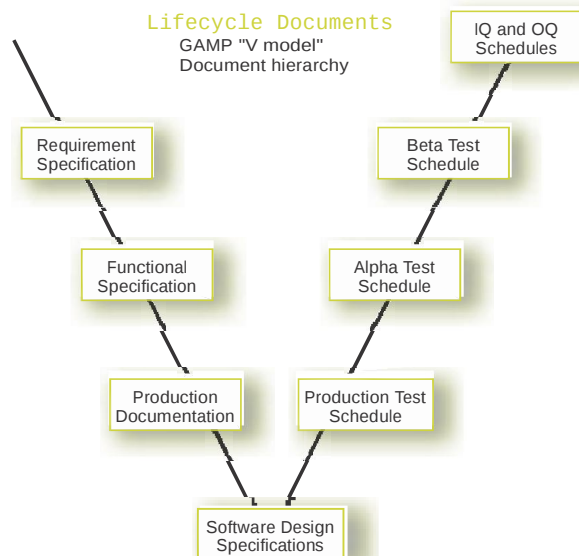
Monitoring the performance of any analytical instrument is key to ensuring the production of reproducible results.

The performance of the Mastersizer 2000 optical bench can be verified using standard latices following Malvern's well-established IQ/OQ procedures. This ensures that the optical performance is the same as it was when the system was manufactured. However, successful measurements will also depend on good performance of the sample dispersion units. Verification of the performance of dispersion units requires the use of a well controlled, polydisperse, spherical particle sizing standard. This requirement is fulfilled by the Malvern single-shot Quality Assurance Standards. These are glass bead standards in the size range 10µm to 120µm, providing a sufficiently broad distribution to challenge the capabilities of both wet and dry dispersion units. A sample-to-sample variability of only 0.3% delivers assured measurement reproducibility, enabling the performance of the dispersion units to be verified in a meaningful way.



Validated performance

As a leading supplier to the pharmaceutical industry, Malvern Instruments supports the validation process with its comprehensive QSpec Validation Elements package. This provides users with a set of tools to enable the development of individual system validation plans. Full lifecycle documentation, following GAMP guidelines, provides complete traceability for the design, production and functionality of the Mastersizer 2000 hardware and software. Users can exercise a right-to-view this documentation or otherwise obtain generic questionnaire answers which cover many of the key issues addressed during a GAMP audit. Other elements include IQ/OQ documentation – the basic building block of any validation plan. Support for software updates is also available to ensure comparability of results. Finally, peace of mind is achieved through the introduction of Escrow agreements, ensuring continued support for the Mastersizer 2000 software system, even in the unlikely event of any failure of Malvern Instruments.



QSpec Elements Validation tool kit includes the following elements:

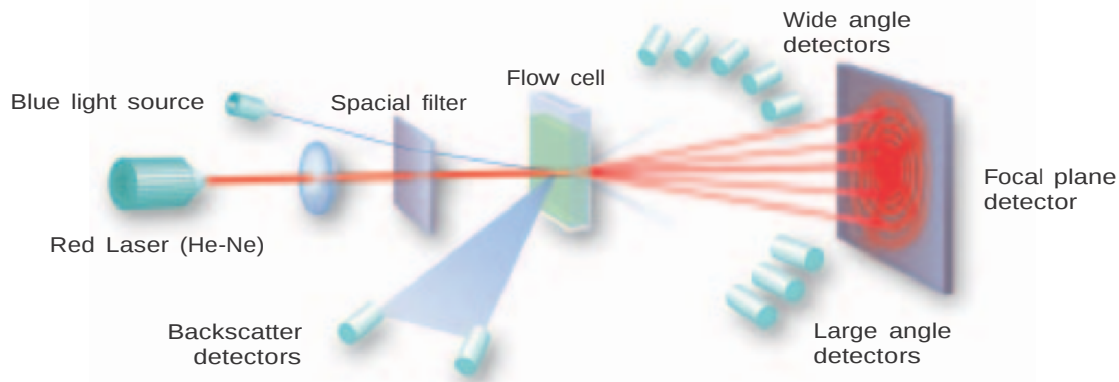
- **IQ/OQ documentation**
- **Software Update Verifications**
- **Escrow contracts**
- **Generic audit questions and answers relating to Malvern Instrument's quality control system**
- **Ability to exercise a right-to-view Malvern's development documentation**
- **User Requirements Specification Matrix**
- **Method development guides**
- **Latex and Glass Bead Standards for Performance Verification**
- **21CFR Part 11 feature key to enable ER/ES support**
- **Validation FAQs**
- **QSpec logbook and validation workbook as a primary record for presentation at a regulatory audit**

21 CFR Part 11

21 CFR Part 11 applies safeguards to electronic records and the use of electronic signatures. Key features offered within the Mastersizer 2000 software to aid technical compliance include more rigorous authority checks, safeguards against unauthorized system access and the provision of an audit trail which logs all key instrument and data modification processes. Unauthorized deletion and modification of records can also be prevented, with automatic backups being retained where deletion or modification has been allowed. Electronic signatures are also supported by the use of Adobe Acrobat® PDF Writer.

www.malvern.co.uk

Fundamentals of the technology



The Mastersizer 2000's wide dynamic range and flexible operation are achieved through Malvern's capacity to precisely engineer and optimize the system according to the physics of light scattering.

During the laser diffraction measurement, particles are passed through a focused laser beam. These particles scatter light at an angle that is inversely proportional to their size. The angular intensity of the scattered light is then measured by a series of photosensitive detectors. The number and positioning of these detectors in the Mastersizer 2000 has been optimized to achieve maximum resolution across a broad range of sizes.

The map of scattering intensity versus angle is the primary source of information used to calculate the particle size. The scattering of particles is accurately predicted by the Mie scattering model. This model is rigorously applied within the Mastersizer 2000 software, allowing accurate sizing across the widest possible dynamic range.

Dual wavelength measurement

Increased sub-micron resolution is delivered via the Mastersizer 2000 patented dual-wavelength detection system. A short wavelength blue light source is used in conjunction with forward and backscatter detection for enhanced sizing performance. This, combined with red-light measurements, provides superior sensitivity across a wide size range.

Single lens detection

The entire 0.02-2000 μ m measurement range is accessed using a single-lens system. This rugged configuration ensures that changing between different dispersion units and sample types is immediate and uncomplicated. Any reconfiguration is automatic and software-controlled.

Intelligent Auto Align

Perfect optical alignment is maintained by a unique software-controlled Auto Align system. Alignment is carried out in seconds either as part of an automated measurement or with a single mouse click on screen. This ensures robust measurements, time and again.



Presenting the sample

Inadequate sample dispersion is a major source of measurement error and one that is shared across all particle sizing techniques.

By making sample dispersion an integral part of the measurement process, the Mastersizer 2000 directly addresses this issue. A wide range of software-controlled sample dispersion units allows the dispersion conditions to be matched to individual applications and samples. Whether you are measuring inert, hazardous or abrasive materials, wet or dry, solvent-based or aqueous dispersions, fragile or robust samples – there is a Mastersizer 2000 dispersion unit designed for the job.

Two or more dispersion units can be connected to the system at any one time. Simple plug-and-play recognition makes changeover almost instantaneous and leaves no room for error. Setting the operating parameters of all units for particular sample types is a straightforward and automatic operation. Using SOPs ensures that any operator bias is minimized.



Sample units can be simply interchanged and set up is automatic

www.malvern.co.uk

Automated operation....

The Mastersizer 2000 Autosampler delivers the ultimate in laboratory productivity and efficiency. This intelligent sample preparation system completely automates laborious sample preparation tasks, enabling true round the clock, unattended operation. This not only increases sample throughput but also frees the user to concentrate on data analysis rather than carrying out routine sample measurements.



With a capacity of up to thirty-six sample pots, the autosampler unit is equipped with an automatic barcode reader that allows it to recognise the contents of each pot. The Mastersizer 2000's powerful SOP system is then used to automatically apply the appropriate measurement protocol, including the addition of any additives required to achieve a stable dispersion. Measurement reproducibility is achieved through the use of a highly effective isokinetic sampling system. This enables the correct sampling of even the broadest particle size distributions without loss of either the coarse or fine fraction. The system also features an auto-concentration facility, ensuring that the sample concentration is always optimal for a perfect size measurement. Dry powders, suspensions and emulsions are all handled equally well.

Scheduling of autosampler measurements is handled by an integrated database system. This allows the user to view the status of the current batch of samples and change sample measurement priorities to allow urgent sample measurements. The user can search, sort and recall measurement data after measurements are completed. Measurement pass-fail criteria can also be viewed, allowing problem samples to be instantly recognised and selected for further analysis.

Autosampler specifications:

- 36 sample capacity
- Bar code sample recognition
- Robust, iso-kinetic sampling mechanism removes measurement bias
- Auto-concentration facility optimizes sample measurement
- Precise, automated dosing of up to 2 additives ensure reproducible sample dispersion
- Disperses and prepares emulsions and dry powders
- Off-line sample scheduling allows pre-preparation of sample trays
- Automatic operation via SOPs
- Compatible with the Hydro 2000S and Hydro 2000G wet dispersion accessories

Mastersizer 2000 technical specifications

Optical Unit	Specification
Size range	Materials in the range 0.02µm to 2000µm
Measurement principle	Mie scattering
Detection systems	Red light: forward scattering, side scattering, back scattering Blue light: wide angle forward and back scattering
Light sources	Red light: helium-neon laser Blue light: solid-state light source
Optical alignment system	Automatic rapid align system with dark field optical reticle
Sample dispersion unit interchange	Sample dispersion units automatically recognized, configured and enabled on insertion of measurement cell cassettes into sizer
Laser system	Mastersizer 2000: Class 1 laser product Autosampler 2000: Class 2 laser product  
Software and data processing	
Minimum Computer Specification	IBM compatible PC Pentium 166MHz, 32MByte RAM (64MByte recommended) and CD-ROM. SVGA screen with 800 x 600 resolution, 256 colour. At least 100MByte of free hard disk space is required to operate the software. This specification does not take into account the operating system requirements. Please note: The MS2000 Autosampler requires 128MByte of free hard disk space and a 1024 x 768 screen resolution.
Operating Systems	Windows NT v 4.0 (Service Pack 6A or Higher), Windows 2000 Professional (Service Pack 2 or Higher) or Windows XP Professional. Windows 2000 Professional is the recommended operating system.
Database utility	Searching, sorting and filtering by search criteria of data records on all parameters of interest.
Custom report facility	Custom report designer using drag-and-drop selection, positioning and sizing of key report elements.
Creation of SOPs and automation	Set up by means of SOP Wizard with extensive advice at all stages of SOP creation. A library of SOPs for common materials is built into the software as standard.
Operating modes	Automated using SOPs created in the software. Manual, using on-screen controls and hot keys.
Weights and dimensions	
Model	Unpacked weight (kg) Dimensions (length; depth; height in mm)
Mastersizer 2000 optical bench	31.0 1293 x 255 x 375
Hydro 2000G	13.7 344 x 352 x 330
Hydro 2000S	11.0 352 x 355 x 332
Hydro 2000MU	15.4 320 x 375 x 335/490
Hydro 2000 Micro Precision	12.2 287 x 253 x 338
Scirocco 2000	11.7 352 x 355 x 332
Autosampler 2000	32.0 550 x 365 x 560

Advanced technology made simple

Malvern Instruments Limited

Enigma Business Park • Grovewood Road • Malvern • Worcestershire • UK •
WR14 1XZ

Tel: +44 (0)1684 892456 • Fax: +44 (0)1684 892789

Malvern Instruments Worldwide

Sales and service centers in over 50 countries for details visit

www.malvern-instruments.co.uk/contact

MasterSizer

2000

Advanced technology made simple

distributor details

Anexo N° 5

Hoja de Resultados Tipo del Equipo Malvern Mastersizer 2000



Anexo N° 6

Hojas de Especificación: Aditivos Espesantes

Proporcionado por: Orinoquia Alimentos.

Anexo N° 7

Manual de Operación del Viscosímetro Brookfield LVE

Proporcionado por: Laboratorio de Separaciones Mecánicas (EIQUCV).



	Manual de operación del Viscosímetro Brookfield LVF	Código	
		Revisión	Fecha
		Pagina 1	

Objetivo General:

Determinar la viscosidad de fluidos, por medio de un viscosímetro rotacional Brookfield.

Objetivos Específicos:

- Familiarizarse con el viscosímetro rotacional Brookfield LVF
- Realizar mediciones confiables de viscosidad para fluidos newtonianos y no newtonianos, empleando el viscosímetro rotacional Brookfield.
- Obtener gráficamente el cambio de viscosidad con la temperatura para un fluido.
- Evaluar la influencia de la temperatura en la viscosidad de los fluidos.
- Comparar la viscosidad obtenida experimentalmente con el valores reportados en la bibliografía.

Manual de operación del Viscosímetro Brookfield LVF

Código

Revisión

Fecha

Página 1

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Agregar en el Beaker aproximadamente 500 ml del fluido.
2. Colocar el Beaker con el fluido sobre la manta de calentamiento (se aplica para el caso que se requiera estudio de viscosidad con la temperatura).
3. Elevar el viscosímetro mediante la perilla de desplazamiento vertical del soporte, hasta que resten 5 cm para el desplazamiento máximo, de tal forma que se cree un espacio considerable para la instalación de la aguja y el protector (ver descripción del equipo).
4. Colocar el protector de la aguja, posicionando el tornillo disponible en el lugar adecuado (ver descripción del equipo).
5. Conectar el viscosímetro a la toma de electricidad de 110 V.
6. Conectar la manta de calentamiento a la toma de electricidad de 110 V.
7. Seleccionar la aguja (N°) de las disponibles para el viscosímetro LVF (La selección se realiza de acuerdo a la viscosidad del fluido tratado, LV1 muy viscosos y LV4 poco viscosos, ver descripción del equipo)
8. Levantar con la mano izquierda suavemente el Lower Shaft y con la mano derecha enroscar la aguja hacia la izquierda cuidadosamente, luego soltar el lower shaft (ver descripción del equipo).
9. Sumergir lentamente la aguja y protector con la perilla de desplazamiento vertical del soporte (para evitar la formación de burbujas), hasta que el nivel de líquido llegue al punto de inmersión de la aguja (ver descripción del equipo).

	Manual de operación del Viscosímetro Brookfield LVF	Código	
		Revisión	Fecha
		Pagina 1	

10. Nivelar el viscosímetro girando las perillas ubicadas en la base del mismo, hasta que la burbuja de nivel se encuentre en el centro del círculo (ver descripción del equipo).

11. Establecer la velocidad de rotación (# RPM), girando el controlador de velocidad hasta que el valor requerido se encuentre sobre la cara superior (La velocidad del motor se establece de manera que el marcador del dial se encuentre en una posición lejos de los extremos de la escala).

12. Encender el motor del viscosímetro, oprimiendo en el botón On/Off. Permita que la escala rota al menos 5 veces, luego detenga la escala con el *Clutch* (manteniéndolo presionado) y apague el motor (ver manual de descripción del equipo).

13. Tomar al lectura que señale el marcador sobre el dial (% de torque) y emplear la tabla del viscosímetro para hallar la viscosidad en centipoise (el valor corresponderá a la viscosidad a la temperatura ambiente).

14. Reportar el valor % de torque y viscosidad sobre la tabla de resultados.

15. Encender la manta de calentamiento e introducir el termómetro en el fluido.

16. Repetir el procedimiento para distintos valores de temperatura, desde el paso 12 a 14. (Nota: falta experiencias para establecer el rango adecuado de temperatura)

17. Apagar la manta de calentamiento.

	Manual de operación del Viscosímetro Brookfield LVF	Código	
		Revisión	Fecha
		Pagina 1	

18. Subir el viscosímetro con la perilla de desplazamiento vertical para desinstalar los accesorios, dejar escurrir el aceite sobre el Beaker.

19. Retirar con cuidado la manta de calentamiento y alejarla del viscosímetro, dejar enfriar.

20. Levantar suavemente con la mano izquierda el *lower shaft* y con la derecha desenroscar cuidadosamente la aguja en sentido antihorario. Usar un solvente si el fluido empleado es tedioso de limpiar.

21. Desinstalar el protector de la aguja.

22. Limpiar la aguja y protector con papel absorbente (disponible en el laboratorio). Usar un solvente si el fluido no es eliminado completamente de los accesorios.

23. Retirar el Beaker de la manta de calentamiento.

24. Agregar el fluido del Beaker en el contenedor de origen (s i no ha sido contaminado o el calentamiento aplicado no ha sido brusco).

25. Limpiar el Beaker con agua y jabón.

Anexo N° 8

Comportamiento Reológico de una Solución de 3.500 ppm de Goma Xantan en Agua

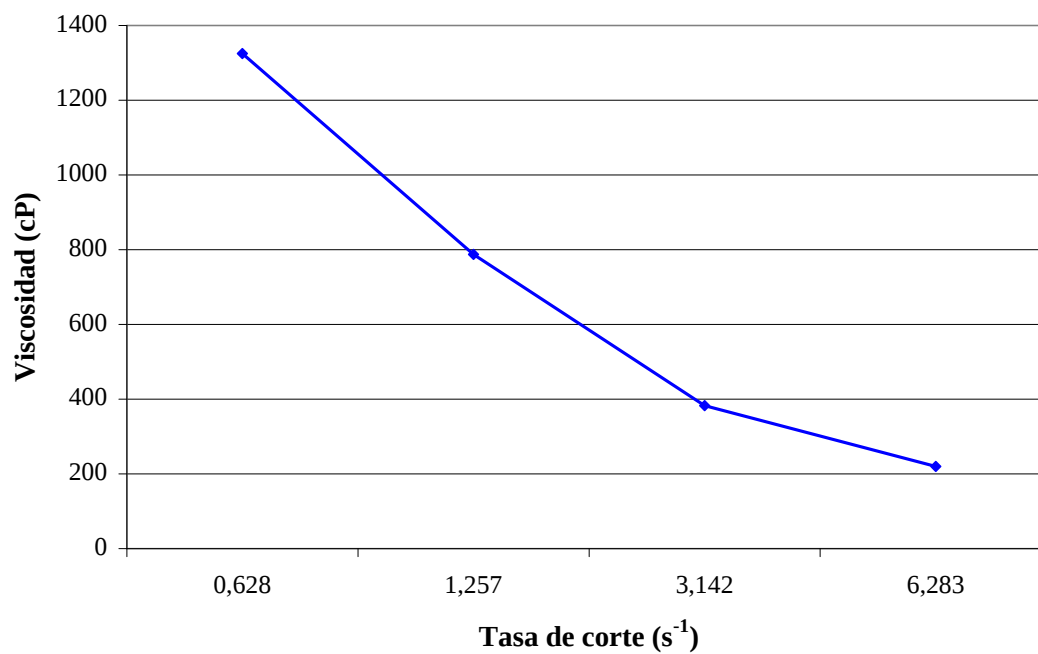


Gráfico N° 29: Comportamiento reológico de una solución de 3.500 ppm de goma Xantan.

Anexo N° 9
Mezclador de la Empresa Orinoquia

