



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE PUEBLA**

---

---

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**CAMBIOS EN CARACTERÍSTICAS SENSORIALES Y  
FUNCIONALES DEL HELADO DURO ELABORADO CON  
MEZCLA TERMOSONICADA.**

**TESIS DE MAESTRÍA**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**PRESENTA:**

**ING. JOSÉ MANUEL TLAHUIZ MOLINA**

**ASESOR:**

**M.C. HÉCTOR RUIZ ESPINOSA**



**BUAP**

H. Puebla Z., Marzo 2015

---

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo es la suma de mucho esfuerzo y dedicación y marca el fin de una grandiosa etapa en mi vida, es por eso que quiero agradecer a las personas que me brindaron su apoyo y que ayudaron a culminar este proyecto. En primer lugar agradezco a mis padres por todo el amor que me han dado en la vida y porque siempre han creído en mí, ya que siempre me han apoyaron y me han animado a perseguir mis sueños y sin los cuales no hubiera podido llegar hasta donde estoy. Agradezco a mis hermanos por ser los motivos por los cuales yo quiera superarme cada vez más y así poder dejarles un buen ejemplo y una buena guía en la vida.

Agradezco a CONACYT y a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por darme la oportunidad de estudiar una maestría y superarme a mí mismo. Agradezco a mi asesor el M.C Héctor Ruiz Espinosa por todo el tiempo dedicado, el apoyo y las críticas constructivas hacia mi persona, ya que sin su guía no hubiera sido posible lograr un excelente trabajo. Agradezco también a la Dra. María Leticia Calderón Fernández y al Dr. Irving I. Ruiz López por sus sugerencias que ayudaron a enriquecer este proyecto. A la Dra. María Eugenia Bárcenas y al Dr. Miguel Ángel Méndez Rojas de la Universidad de las Américas Puebla, les agradezco por darme la confianza y abrirme las puertas de su institución de trabajo para poder llevar a cabo las determinaciones de viscosidad y tamaño de partícula. Le agradezco además al Dr. Raúl J. Delgado Macuil y al Ing. José Martín Ruvalcaba del Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada dónde se realizaron las determinaciones de composición de crema.

Estoy muy agradecido con el apoyo mostrado de mis compañeros en el tiempo que trabaje en el laboratorio. A Arianna Gallegos le agradezco su compañía en los largos días de trabajo y su apoyo incondicional en los altibajos que tuve en el proyecto. A mis chicas de servicio, Victoria Espíndola y Karina León les agradezco todo su apoyo en las determinaciones y las pruebas sensoriales, también les agradezco los momentos gratos que me hicieron pasar, sin los cuales los experimentos no hubieran sido tan divertidos. Les agradezco a mis compañeros de laboratorio y de la maestría por hacer que el transcurso de estos dos años fuera muy placentero. Además me gustaría agradecer a todas las personas que apoyaron directa o indirectamente en la elaboración de este trabajo.

**¡Gracias!**

---

## ABREVIATURAS

**$\alpha$ -LA:**  $\alpha$ -Lactalbúmina

**AP:** Alta presión

**$\beta$ -LG:**  $\beta$ -Lactoglobulina

**CMC:** Carboximetilcelulosa

**CN:** Caseína

**CRA:** Capacidad de retención de agua

**DCC:** Diseño central compuesto

**GG:** Glóbulo de grasa

**HTST:** Alta temperatura, tiempo corto (High Temperature, Short Time)

**IA:** Incorporación de aire

**LTLT:** Baja temperatura, tiempo largo (Low Temperature, Long Time)

**MPC:** Concentrado de proteína de leche (Milk Protein Concentrate)

**SLNG:** Sólidos lácteos no grasos

**TS:** Termosonicación

**US:** Ultrasonido

**WPC:** Concentrado de proteína de suero (Whey Protein Concentrate)

---

## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
I. RESUMEN.....	1
II. INTRODUCCIÓN.....	2
III. ANTECEDENTES DEL PROYECTO.....	5
3.1. Historia.....	5
3.2. Definición.....	5
3.3. Tipos de helado.....	6
3.4. Composición básica del helado.....	8
3.4.1. Grasa.....	8
3.4.2. Sólidos lácteos no grasos.....	9
3.4.2.1. Proteínas.....	9
3.4.2.2. Lactosa.....	11
3.4.2.3. Minerales.....	11
3.4.3. Edulcorantes.....	11
3.4.4. Estabilizantes.....	12
3.4.4.1. Tipos de estabilizantes.....	12
3.4.5. Emulsificantes.....	14

---

3.5.	Elaboración del helado.....	15
3.5.1.	Mezclado.....	15
3.5.2.	Pasteurización.....	16
3.5.3.	Homogeneización.....	17
3.5.4.	Madurado.....	18
3.5.5.	Congelado.....	19
3.5.6.	Endurecimiento.....	20
3.6.	Microestructura del helado.....	21
3.7.	Características fisicoquímicas del helado.....	24
3.7.1.	Propiedades reológicas.....	24
3.7.2.	Incorporación de aire.....	26
3.7.3.	Velocidad de drenado.....	28
3.7.4.	Textura.....	28
3.7.5.	Recristalización.....	29
3.8.	Ultrasonido.....	30
3.8.1.	Definición y método de acción.....	30
3.8.2.	Aplicaciones en los alimentos.....	33
3.9.	Alternativas de sustitución de aditivos en helado.....	37
IV.	METODOLOGÍA.....	39
4.1.	Plan de investigación.....	39
4.2.	Materiales y métodos.....	39

---

---

4.2.1.	Viscosidad.....	40
4.2.2.	Color.....	41
4.2.3.	Tamaño de partícula.....	42
4.2.4.	Incorporación de aire.....	42
4.2.5.	Velocidad de drenado.....	43
4.2.6.	Textura.....	43
4.2.7.	Optimización de tratamientos.....	43
4.2.8.	Cálculos de calorimetría.....	44
4.2.9.	Evaluación sensorial.....	45
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
5.1.	Influencia de la termosonicación en las propiedades reológicas.....	47
5.2.	Influencia de la termosonicación en el color de mezcla.....	50
5.3.	Influencia de la termosonicación en el tamaño de partícula.....	55
5.4.	Influencia de la termosonicación en la incorporación de aire.....	63
5.5.	Influencia de la termosonicación en la firmeza.....	66
5.6.	Influencia de la termosonicación en la velocidad de drenado.....	70
5.7.	Optimización de los tratamientos.....	74
5.8.	Calorimetría.....	76
5.9.	Influencia de la termosonicación en el análisis sensorial.....	77
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
VII.	BIBLIOGRAFIA.....	84

---

---

VIII. APÉNDICES.....	102
----------------------	-----

---

## ÍNDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 1.</b> Estándares mínimos de composición de helado en países seleccionados. ....	6
<b>Tabla 2.</b> Valores promedio para contenido de grasa, sólidos totales, overrun y costo entre las categorías de helado.....	7
<b>Tabla 3.</b> Mezclas sugeridas para helado duro.....	8
<b>Tabla 4.</b> Rangos y niveles experimentales de las variables independientes del DCC.....	39
<b>Tabla 5.</b> Formato para la comparación de tratamientos para el índice R. ....	46
<b>Tabla 6.</b> Efecto de la termosonicación en los parámetros reológicos de la mezcla para helado...	48
<b>Tabla 7.</b> Parámetros de color de las mezclas termosonicadas para helado duro. ....	51
<b>Tabla 8.</b> Distribución de tamaño de partícula de las mezclas termosonicadas para helado duro.	56
<b>Tabla 9.</b> Valores obtenidos para la incorporación de aire en los helados termosonicados.....	64
<b>Tabla 10.</b> Valores obtenidos para la firmeza en los helados termosonicados. ....	67
<b>Tabla 11.</b> Velocidad de drenado e inicio de drenado en helados con diferentes tratamientos de TS. ....	70
<b>Tabla 12.</b> Parámetros utilizados para la optimización de los tratamientos.....	74
<b>Tabla 13.</b> Factores obtenidos y respuestas teóricas esperadas de los tratamientos óptimos. ....	75
<b>Tabla 14.</b> Tratamientos óptimos y sus factores convertidos.....	75
<b>Tabla 15.</b> Comparación de los valores teóricos con los valores obtenidos de los tratamientos óptimos. ....	76
<b>Tabla 16.</b> Valores obtenidos para el parámetro olor a vainilla. ....	78

---

<b>Tabla 17.</b> Valores obtenidos para el parámetro sabor a vainilla. ....	78
<b>Tabla 18.</b> Valores obtenidos para el parámetro gomosidad.....	79
<b>Tabla 19.</b> Valores obtenidos para el parámetro arenosidad. ....	79
<b>Tabla 20.</b> Valores obtenidos para el parámetro sabor metálico.....	80
<b>Tabla 21.</b> Valores de frecuencia para la comparación del tratamiento óptimo 1 con el control...	81
<b>Tabla 22.</b> Valores de frecuencia para la comparación del tratamiento óptimo 2 con el control...	81
<b>Tabla 23.</b> Valores de frecuencia para la comparación del tratamiento óptimo 1 con el óptimo 2. .....	81

---

## ÍNDICE DE FIGURAS.

<b>Figura 1.</b> Esquema de un congelador de superficie raspada. ....	20
<b>Figura 2.</b> Coalescencia parcial en glóbulos de grasa. ....	21
<b>Figura 3.</b> Micrografía que muestra glóbulos de grasa en la matriz y en la superficie de las burbujas de aire. ....	22
<b>Figura 4.</b> Desestabilización competitiva de las películas interfaciales estabilizadas proteicamente por efecto de los emulsificantes. ....	24
<b>Figura 5.</b> Cavitación ultrasónica. ....	32
<b>Figura 6.</b> Dispersión y regresión de datos de viscosidad vs tamaño de partícula de mezcla de helado sometidas a tratamientos selectos de termosonicación. ....	49
<b>Figura 7.</b> Dispersión y regresión de datos de viscosidad vs coeficiente de consistencia de mezcla de helado sometidas a tratamientos selectos de termosonicación. ....	50
<b>Figura 8.</b> Valores de luminosidad en las mezclas termosonicadas para helado duro. ....	52
<b>Figura 9.</b> Valores del parámetro $a^*$ en las mezclas termosonicadas para helado duro. ....	53
<b>Figura 10.</b> Valores del parámetro $b^*$ en las mezclas termosonicadas para helado duro. ....	53
<b>Figura 11.</b> Valores de cambio de color neto ( $\Delta E$ ) en las mezclas termosonicadas para helado duro. ....	54
<b>Figura 12.</b> Diferencias presentadas en el cambio de color neto de las mezclas para helado tratadas con US. ....	55
<b>Figura 13.</b> Distribuciones de tamaño de partícula para mezcla termosonicada con 20% de estabilizante. ....	58

---

<b>Figura 14.</b> Distribuciones de tamaño de partícula para mezcla termosonicada con 50% de estabilizante.....	59
<b>Figura 15.</b> Distribuciones de tamaño de partícula para mezcla termosonicada con 80% de estabilizante.....	60
<b>Figura 16.</b> Gráficas de superficie y de contornos del tamaño del glóbulo de grasa en mezclas termosonicadas con un 20% de estabilizante .....	61
<b>Figura 17.</b> Gráficas de superficie y de contornos del tamaño del glóbulo de grasa en mezclas termosonicadas con un 50% de estabilizante. ....	62
<b>Figura 18.</b> Gráficas de superficie y de contornos del tamaño del glóbulo de grasa en mezclas termosonicadas con un 80% de estabilizante. ....	62
<b>Figura 19.</b> Gráficas de superficie y de contornos de la incorporación de aire en helados termosonicados con un 20% de estabilizante. ....	64
<b>Figura 20.</b> Gráficas de superficie y de contornos de la incorporación de aire en helados termosonicados con un 50% de estabilizante. ....	65
<b>Figura 21.</b> Gráficas de superficie y de contornos de la incorporación de aire en helados termosonicados con un 80% de estabilizante. ....	65
<b>Figura 22.</b> Gráficas de superficie y de contornos de la firmeza en helados termosonicados con un 20% de estabilizante. ....	68
<b>Figura 23.</b> Gráficas de superficie y de contornos de la firmeza en helados termosonicados con un 50% de estabilizante. ....	69
<b>Figura 24.</b> Gráficas de superficie y de contornos de la firmeza en helados termosonicados con un 80% de estabilizante. ....	69
<b>Figura 25.</b> Correlación que existe entre la velocidad de drenado y el tiempo en que tarda en caer la primer gota. ....	71
<b>Figura 26.</b> Gráficas de superficie y de contornos de la velocidad de drenado en mezclas termosonicadas con un 20% de estabilizante. ....	72

---

---

**Figura 27.** Gráficas de superficie y de contornos de la velocidad de drenado en mezclas termosonicadas con un 50% de estabilizante. .... 73

**Figura 28.** Gráficas de superficie y de contornos de la velocidad de drenado en mezclas termosonicadas con un 80% de estabilizante. .... 73

**Figura 29.** Regresiones de los tratamientos óptimos para 400W (a) y 200W (b)..... 77

.....

---

## I. RESUMEN.

Actualmente la tendencia de la industria alimenticia es la de elaborar productos con etiqueta limpia, ya que se ha incrementado la demanda de este tipo de alimentos por parte de los consumidores que buscan productos naturales y mínimamente procesados. Se tiene evidencia de estudios anteriores que sugiere que los hidrocoloides estabilizantes pueden ser sustituidos parcial o totalmente mediante la modificación de los componentes de la matriz alimenticia (principalmente proteínas) al utilizar tecnologías emergentes como la termosonicación (TS). En el presente trabajo se investigó el efecto de tratamientos selectos de TS y de la concentración de los estabilizantes sobre las propiedades funcionales y sensoriales del helado duro. Los resultados indican que las propiedades viscosidad, incorporación de aire (IA) tamaño de partícula, color y drenado aumentan y la firmeza disminuye cuando se incrementa la intensidad del tratamiento con US. En cuanto a la concentración de estabilizante, las mezclas con bajo contenido (<20%) presentaron los valores mínimos para tamaño de partícula y firmeza y los valores máximos para luminosidad. Se presentó una mayor IA y una menor viscosidad con respecto al control y la velocidad de drenado fue similar al tratamiento control. En las mezclas con contenido intermedio (50%) se observó el máximo tamaño de partícula y la máxima viscosidad, además de que se obtuvo una luminosidad y una IA mayor con respecto al control. En el caso de la firmeza y la velocidad de drenado los valores fueron similares al tratamiento control. Para el caso de las mezclas con alto contenido (>80%) se obtuvieron los valores máximos de firmeza y velocidad de drenado, una luminosidad e IA mayores que el control, una mayor variabilidad en el tamaño de partícula y una viscosidad similar al control. En cuanto a las propiedades sensoriales del helado duro, se determinó por medio de un análisis de preferencia que las personas no encontraron diferencias significativas entre el control (pasteurizado) y los tratamientos óptimos (con menor cantidad de estabilizantes y tratados con TS), además se observó que tuvieron una mayor preferencia hacia los helados tratados con TS que hacia el control. Con base en estos resultados se puede aseverar que los tratamientos de TS son capaces de modificar las características de la mezcla permitiendo una elaboración de productos sin hidrocoloides estabilizantes o con una cantidad significativamente menor que además presenten características similares o superiores a los helados pasteurizados.

---

## II. INTRODUCCIÓN.

Una de las principales tendencias de desarrollo de productos se basa en la búsqueda de alternativas de productos que no solo sean microbiológicamente seguros y con vida de anaquel apropiada sino que también posean características de frescura y alta calidad sensorial. El consumidor actual valora los productos de etiqueta limpia, aquellos que reducen o prescinden del uso de aditivos alimentarios. En una encuesta realizada en E.U.A, dos terceras partes de las personas perciben que el término *natural* es un factor importante para determinar el alimento de su elección, mientras que los aditivos identificados como *sintéticos* provocan desconfianza, y a pesar de que éstos han sido aceptados como necesarios para la conservación de los alimentos, la reacción automática frente a estos es negativa. Por ello, una proporción importante de los consumidores estima necesario reducir el uso de aditivos en los productos alimenticios (Brockman & Beeren, 2011).

Tradicionalmente se han usado tratamientos térmicos como técnica de conservación de los productos alimenticios. Dependiendo de la intensidad del tratamiento se clasifican en pasteurización (entre 60 y 100°C) y esterilización (>100°C). La esterilización provee una conservación del alimento a largo plazo mientras que la pasteurización confiere estabilidad a corto plazo y/o requiere de factores de conservación adicionales como la refrigeración y control del pH (Berk, 2013). En el caso particular de la leche, los métodos convencionales para pasteurizarla incluyen el uso de una temperatura baja y largo tiempo de exposición (LTLT) (63°C por 30 min) y alta temperatura y tiempos cortos (HTST) (72°C por 15 s). A pesar de que la seguridad microbiológica es lograda, la calidad de la leche se reduce. Algunos de los cambios químicos más comunes que toman lugar incluyen: desnaturalización proteica, degradación de vitaminas, inactivación enzimática, reacciones de Maillard y producción de lisinoalanina. Las altas temperaturas son responsables por estos efectos y su uso se ve reflejado en la pérdida de componentes nutrimentales y cambios en sus propiedades sensoriales y funcionales (Chouliara *et al.*, 2010). Por lo antes expuesto las tecnologías no térmicas han sido estudiadas en años recientes, para así poder brindar una alternativa a lo convencional y encontrar un tratamiento que permita el mantenimiento de las características sensoriales y/o nutrimentales del producto.

---

Las tecnologías no térmicas ofrecen ventajas en el producto final además de seguridad microbiológica, ya que aunque varias de ellas poseen un componente térmico, éste no es el factor predominante y como consecuencia, la calidad del alimento puede mejorar ya que los productos obtenidos son más frescos y las pérdidas de color, sabor y nutrientes son mínimas. Las tecnologías emergentes más populares probadas en los alimentos incluyen alta presión (AP), campos eléctricos pulsados, luz ultravioleta, irradiación, pulsos de luz y ultrasonido (US) (Knorr *et al.*, 2011). Sin embargo, los tratamientos térmicos en los productos lácteos se han mantenido dominantes en la industria (Considine *et al.*, 2007).

El US es utilizado en el área alimenticia dependiendo de su frecuencia, por ejemplo, el de alta intensidad es utilizado para degasificar alimentos líquidos, para inducir reacciones de óxido-reducción, para la inactivación de enzimas y microorganismos, y para la inducción de los procesos de cristalización. Una ventaja del US ante otras técnicas de procesamiento de alimentos es que por la familiaridad del consumidor con la técnica; las ondas sonoras son generalmente consideradas seguras, no tóxicas y amigables con el ambiente (Kentish & Ashokkumar, 2011). El efecto bactericida del US fue reportado desde los años veinte. Sin embargo, para alcanzar una reducción de cinco ciclos logarítmicos en el número de células patógenas requeridas por la US Food and Drug Administration (USFDA) para la pasteurización de leche, se requiere un tiempo relativamente largo y una alta densidad de energía acústica cuando la sonicación se desarrolla a temperaturas sub-letales. Aunque se han realizado varios estudios (Earnshaw *et al.*, 1995; López-Malo *et al.*, 1999; Ordoñez *et al.*, 1987) aún no es conclusivo cuál es el patógeno más resistente al proceso de sonicación por lo que para asegurar la inactivación microbiana en magnitudes apropiadas, se desarrolló una combinación de calor y sonicación en un proceso llamado termosonicación (TS), en el cual un efecto aditivo o sinérgico puede observarse entre estos factores de conservación (Bermúdez-Aguirre *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2009).

La aplicación de TS en la leche ofrece la oportunidad de elaborar un producto estable y seguro desde el punto de vista microbiológico con una vida de anaquel en refrigeración ligeramente mayor a la esperada para un producto únicamente pasteurizado (16 días vs 14 días) (Bermúdez-Aguirre *et al.*, 2009). Además, otras características se mejoran, tales como: una mejor disponibilidad de grasa butírica, un mejor color, apariencia y homogeneizado. Se han reportado modificaciones en la estructura de las proteínas lácteas producto de tratamientos con US en diversas matrices alimenticias (leche, yogurt, queso, entre otras), así como cambio en propiedades

---

de hidrocoloides y otros polímeros alimenticios (Chandrapala *et al.*, 2011, 2014; Ching *et al.*, 2014; Erkaya *et al.*, 2014; Jambrak *et al.*, 2008, 2014; Koh *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2014; O'Sullivan *et al.*, 2014; Pingret *et al.*, 2011; Riener *et al.*, 2009b; Shanmugam *et al.* 2012; Villamiel & de Jong, 2000; Yanjun *et al.*, 2014; Zisu *et al.* 2013). El estudio de los efectos del US en las propiedades del helado aportará nuevos conocimientos al área, ya que es escasa la información de investigaciones previas en mezcla para helado. Por lo tanto, su estudio permitirá caracterizar al helado tratado y determinará si es posible utilizar una menor cantidad de los aditivos o prescindir de algunos de ellos en la elaboración del mismo, en particular de hidrocoloides estabilizantes.

Tomando en cuenta el área de oportunidad antes mencionada se presentan los siguientes objetivos del proyecto.

#### **OBJETIVO GENERAL.**

Comparar las características sensoriales y funcionales de helados duros elaborados con mezcla pasteurizada con y sin asistencia de ultrasonido de alta intensidad, para evaluar la posibilidad de reducir o eliminar el uso de polisacáridos estabilizantes.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Determinar las propiedades fisicoquímicas (viscosidad, color, tamaño de partícula, incorporación de aire, textura y velocidad de drenado) de la mezcla para helado pasteurizada con y sin asistencia de ultrasonido a diferentes concentraciones de estabilizante, potencias de sonicación y energías específicas entregadas para seleccionar los parámetros óptimos de TS.
- Evaluar el efecto de la reducción del contenido de estabilizantes de la mezcla para helado pasteurizada con y sin asistencia de ultrasonido sobre las propiedades sensoriales del helado duro.

---

### III. ANTECEDENTES DEL PROYECTO.

#### 3.1. Historia.

El helado ha existido desde hace al menos 300 años y no fue inventado como tal, sino que fue evolucionando a partir de viejas prácticas centenarias que incluyen el congelamiento de alimentos y bebidas con nieve, descritas en registros históricos romanos que datan del siglo I antes de Cristo. Se presume que los jinetes mongoles lo descubrieron cuando llevaban crema en contenedores hechos de intestinos de animales a lo largo de sus viajes a través del desierto en el invierno. Mientras galopaban, la crema se agitaba y simultáneamente se congelaba debido a las temperaturas bajo cero del ambiente. En 1676 Pierre Barra describió el congelamiento de una mezcla de fruta, crema y azúcar usando nieve y nitrato de potasio, pero fue hasta 1692 que Audiger observó que era importante la agitación de la mezcla durante su congelamiento para romper los cristales de hielo más grandes. Este procedimiento es la base de la metodología actual para elaborar helado (Clarke, 2004; Goff & Hartel, 2013).

#### 3.2. Definición.

El helado es un sistema complejo que consta de dos fases, una continua y otra dispersa. La fase continua consiste de jarabe sin congelar que contiene azúcares y minerales disueltos. La fase dispersa consiste de burbujas de aire, glóbulos de grasa, cristales de hielo, proteínas e hidrocoloides (Innocente *et al.*, 2009; Marshall, 2003a).

La definición legal de helado varía de país a país (Tabla 1. ). En el Reino Unido se define como un producto alimenticio congelado que contiene un mínimo de grasa del 5% y 7.5% de sólidos no grasos (proteínas, azúcares y minerales), el cual se obtiene mediante un tratamiento térmico seguido de la congelación de una emulsión de grasa, sólidos lácteos y azúcar. De acuerdo a los estándares de Estados Unidos, el helado debe contener al menos 10% de grasa láctea y 20% de sólidos no grasos (Clarke, 2004; Marshall, 2003b). Para el caso de México, el helado es un alimento

producido mediante la congelación con o sin agitación de una mezcla pasteurizada compuesta por una combinación de ingredientes lácteos pudiendo contener grasas vegetales, frutas, huevo y sus derivados, saborizantes, edulcorantes y otros aditivos alimentarios. Este producto debe contener entre 7 y 10% de grasa, 2.5% de proteínas y un mínimo de 30% de sólidos totales (NOM-036-SSA1-1993; PROY-NMX-F-714-COFOCALEC-2012).

**Tabla 1.** Estándares mínimos de composición de helado en países seleccionados.

<b>País</b>	<b>Grasa (%)</b>	<b>Proteína (%)</b>	<b>Sólidos Lácteos (%)</b>	<b>Sólidos Totales (%)</b>	<b>Sólidos / L (g)</b>
<b>Alemania</b>	10	-	-	-	-
<b>Australia</b>	10	-	-	-	168
<b>Brasil</b>	3	2.5	-	-	152
<b>Canadá</b>	10	-	-	36	180
<b>Dinamarca</b>	5	-	-	-	-
<b>E.U.A.</b>	10	-	20	-	192
<b>Finlandia</b>	8	2.5	-	-	-
<b>Italia</b>	8	2.5	-	32	-
<b>México<sup>1</sup></b>	7	2.5	-	30	-
<b>Nueva Zelanda</b>	10	-	-	-	168
<b>Noruega</b>	9	-	-	35	-
<b>Reino Unido</b>	5	2.5	-	-	-

Adaptada de Goff & Hartel (2013).

<sup>1</sup>PROY-NMX-F-714-COFOCALEC-2012.

### **3.3. Tipos de helado.**

En Estados Unidos, los estándares para helado establecidos por la Administración de Medicinas y Alimentos (FDA) posibilitan a los consumidores obtener productos consistentes sin distinción de marcas o tipos de producto. Este organismo permite el uso de descriptores tales como *ligero*, *reducido en grasa* y *bajo en grasa*, lo cual permite que los consumidores seleccionen dichos productos con base en su contenido nutricional. Además de los estándares anteriores, también se permite utilizar una clasificación comercial de acuerdo a la calidad con que se elabora el helado.

La clasificación comercial comprende términos tales como: *económico, estándar, premium y súper premium* (IDFA, 2015). Los helados económicos son aquellos que tienen los mínimos requerimientos para composición y el máximo límite para la incorporación de aire (IA) (ver sección 3.7.2), además de que se elaboran a partir de grasa vegetal, leche y/o sólidos lácteos y por lo general contienen altas cantidades de edulcorantes de maíz y estabilizantes. Estos ingredientes son más económicos y por lo tanto el precio del helado es considerablemente menor. Los helados de calidad estándar, premium y súper premium se caracterizan por tener ingredientes de alta calidad y un menor *overrun*. La diferencia entre estos tres tipos es básicamente la cantidad de grasa y sólidos no grasos que los compone. Los rangos de componentes principales y de sólidos totales en los diferentes descriptores comerciales de helados se muestran en la Tabla 2 (Goff, 2011b).

**Tabla 2.** Valores promedio para contenido de grasa, sólidos totales, overrun y costo entre las categorías de helado.

<b>Grupo</b>	<b>Grasa</b>	<b>SLNG</b>	<b>Edulcorantes</b>	<b>Estabilizantes</b>	<b>Sólidos totales</b>
<b>Sin grasa</b>	<0.5	12-14	18-22	1.0	28-32
<b>Bajo en grasa</b>	2-5	12-14	18-21	0.8	28-32
<b>Ligero</b>	5-7	11-12	18-20	0.5	30-35
<b>Grasa reducida</b>	7-9	10-12	18-19	0.4	32-36
<b>Económico</b>	10	10-11	15-17	0.4	35-36
<b>Estándar</b>	10-12	9-10	14-17	0.2-0.4	36-38
<b>Premium</b>	12-14	8-10	13-16	0.2-0.4	38-40
<b>Súper premium</b>	14-18	5-8	14-17	0-0.2	40-42

Adaptada de Goff (2011b).

A pesar de considerarse como un postre debido a su alto contenido de azúcares, el helado posee una composición balanceada en términos de macronutrientes y su gran aceptabilidad hacen de él un producto relevante en el mercado internacional y de interés en materia de investigación (Tait *et al.*, 2003).

---

### 3.4. Composición básica del helado.

La mezcla base para helado se compone de los siguientes ingredientes: grasa, sólidos lácteos no grasos, edulcorantes, estabilizantes y emulsificantes. Algunos productos lácteos son utilizados para suministrar estos componentes y son elegidos con base en su disponibilidad, costo y calidad esperada (Goff, 2011a). Como se explica en las secciones siguientes, cada componente utilizado en la formulación juega un papel específico e importante en el desarrollo del helado desde la mezcla hasta el producto congelado. Balances de mezclas sugeridas a contenidos fijos de grasa se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Mezclas sugeridas para helado duro.

<b>Componente</b>	<b>%</b>						
<b>Grasa</b>	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0
<b>SLNG<sup>1</sup></b>	11.0	11.0	10.5	10.5	10.0	10.0	9.5
<b>Sacarosa</b>	10.0	10.0	12.0	14.0	14.0	15.0	15.0
<b>Sólidos de maíz</b>	5.0	5.0	4.0	3.0	3.0	-	-
<b>Estabilizante</b>	0.35	0.35	0.30	0.30	0.25	0.20	0.15
<b>Emulsificante</b>	0.15	0.15	0.15	0.14	0.13	0.12	0.10
<b>Sólidos Totales</b>	36.5	37.5	38.95	40.94	41.38	40.32	40.75

Adaptada de Goff (2009).

<sup>1</sup>Sólidos lácteos no grasos.

#### 3.4.1. Grasa.

En la elaboración del helado generalmente se utilizan dos tipos de grasa: láctea (butírica) y no láctea. Las fuentes comunes de grasa láctea incluyen leche, crema, mantequilla y grasa anhidra. En cuanto a fuentes de grasa no láctea se encuentran las vegetales, tales como el aceite de coco y el aceite de palma refinado (Marshall *et al.*, 2003). La importancia de las estructuras que forma la grasa en el helado es ampliamente reconocida hoy en día, ya que proveen características sensoriales únicas, incluyendo sabor característico y textura suave al comerlo por medio de la lubricación del paladar, además de que da cuerpo al helado y ayuda a la retención de la forma

---

durante el derretimiento. Las limitaciones en el uso excesivo de la grasa en la mezcla incluyen costo elevado, cambios en la habilidad para batir de acuerdo a la concentración de grasa y consumo limitado debido al alto valor calórico (Goff, 2008; Goff & Hartel, 2013).

En la leche, la grasa está presente como glóbulos dispersos en la fase acuosa (E *et al.*, 2010). Los lípidos presentan diferentes puntos de fusión y densidades, así como muchas otras propiedades físicas que pueden ser alteradas por la presión, el calentamiento y el enfriamiento. Los triglicéridos de la grasa láctea tienen puntos de fusión en un rango de -40 a 40°C, por lo que en condiciones de refrigeración siempre hay una combinación de líquido y grasa cristalizada dentro de los glóbulos. La relación sólido-líquido resultante es importante para la formación de las estructuras del helado (Goff, 2011b).

### **3.4.2. Sólidos lácteos no grasos.**

Los sólidos lácteos no grasos (SLNG) contribuyen significativamente al desarrollo de sabor y textura del helado. Estos incluyen a lactosa, proteínas lácteas (micelas de caseína y proteínas del suero), minerales, vitaminas y otros componentes menores de leche; fuentes comunes de estos componentes son productos lácteos concentrados y deshidratados como leche evaporada descremada, leche descremada en polvo e ingredientes derivados de la proteína del suero, como concentrados proteicos (WPC) (Goff, 2011a).

#### **3.4.2.1. Proteínas.**

Las proteínas son moléculas funcionales que se utilizan ampliamente en la industria de alimentos debido a la diversidad de funciones que desempeña. Estas son de interés particular en sistemas alimenticios por sus propiedades gelificantes, emulsificantes, espumantes, de capacidad de retención de agua y aceite entre otras. En el caso particular del helado, estas propiedades se deben a su habilidad de adsorción en la interfase aceite-agua (O'Sullivan *et al.*, 2014). La actividad superficial de las proteínas es debida a su naturaleza anfifílica, ya que presenta en su estructura molecular grupos hidrofílicos e hidrofóbicos (Beverung *et al.*, 1999). La estructura de las proteínas es voluminosa por lo que se difunden lentamente hacia la interfase, pero una vez en ella presentan

---

cambios conformacionales (desnaturalización superficial) y se acomodan a sí mismas para posicionar sus aminoácidos hidrofóbicos en la fase grasa y los aminoácidos hidrofílicos en la fase acuosa, este efecto reduce la tensión en la interfase y la energía libre total del sistema (McClements, 2004). Durante la desnaturalización proteica, el peso molecular y la estructura primaria no cambian y se consideran constantes. Sin embargo, el punto isoeléctrico puede variar debido a estructuras intermedias y desnaturalizadas que exponen sus aminoácidos cargados; esto deriva en un incremento en el potencial de interacción favoreciendo la agregación. Por lo tanto, es esencial determinar las transiciones estructurales específicas durante el plegado/desdoblado de las proteínas para comprender plenamente la base molecular de su funcionalidad (Foegeding & Davis, 2011).

Las proteínas por sí mismas son capaces de formar espumas bajo agitación. Inherentemente las proteínas lácteas son anfotéricas y contribuyen al desarrollo de la estructura en el helado, pero el proceso de elaboración puede inducir cambios en sus propiedades fisicoquímicas para proveer otras funciones como las de emulsificación, batido y capacidad de retención de agua (E. *et al.*, 2010). La capacidad de retención de agua mejora la viscosidad en la mezcla, la cual imparte mayor cuerpo al helado, incrementa el tiempo de fundido y genera una suavidad mejorada durante el consumo (Goff, 2011a). Por otro lado, se pueden formar enlaces covalentes entre proteínas por reacciones químicas o enzimáticas haciendo polímeros de una o varias proteínas, esto se puede usar para hacer ingredientes modificados para formar estructuras específicas (Buchert *et al.*, 2010).

La leche cruda contiene aproximadamente 3.25% de proteína total, la cual consiste mayoritariamente de caseínas  $\alpha_{s1}$ ,  $\alpha_{s2}$ ,  $\beta$  y  $\kappa$ , y proteínas de suero, donde destacan  $\beta$ -lactoglobulinas y  $\alpha$ -lactalbúmina, las cuales existen como una dispersión coloidal. Diversas operaciones de procesamiento de alimentos son usadas para convertir este fluido en estructuras coloidales sólidas y semisólidas. En las proteínas lácteas la estructura desdoblada intrínsecamente de las caseínas, contraria a la estructura globular compacta de las proteínas del suero, altera su habilidad de formación de películas y por lo tanto su habilidad de formación de espumas (Marinova *et al.*, 2009). La habilidad de formar y/o estabilizar redes, espumas y emulsiones son las propiedades funcionales de las proteínas que comúnmente se estudian (Rodríguez-Patino *et al.*, 2008).

---

#### **3.4.2.2. Lactosa.**

La lactosa es un disacárido compuesto por una molécula de glucosa y una de galactosa y constituye una tercera parte del contenido de materia sólida en leche y 20% de los carbohidratos en el helado. No es un endulzante de importancia en la elaboración de helados puesto que la sacarosa tiene aproximadamente 5 veces más poder edulcorante que esta. Sin embargo, su rol es relevante dado que disminuye el punto de congelación de la mezcla aunque también puede incrementar la posibilidad de sensación de arenosidad en el helado. Para evitar esta característica no agradable en el helado, entre mayor sea el contenido de grasa del helado, menor debe de ser el contenido de sólidos lácteos no grasos (Alvarez *et al.*, 2005; Goff & Hartel, 2013b).

#### **3.4.2.3. Minerales.**

Los minerales encontrados en el helado son similares a aquellos encontrados en la leche. El único mineral claramente abundante en el helado y que aporta el 10% de la dieta recomendada diaria es el calcio (Tait *et al.*, 2003). También contribuyen a la disminución del punto de congelación.

#### **3.4.3. Edulcorantes.**

Los azúcares son ingredientes mayoritarios en la elaboración de helado y tienen una influencia importante en el estatus nutricional del producto. La sacarosa es la más ampliamente usada, pero la mayoría de los helados contienen al menos dos tipos de edulcorante: sacarosa y lactosa. Además de proveer dulzor (con una contribución marcadamente menor de la lactosa), los edulcorantes mejoran la textura, la palatabilidad y el sabor del helado. Su habilidad para abatir el punto de congelación de una solución permite controlar la relación temperatura-dureza de producto. Para determinar la formulación de edulcorantes apropiada para una mezcla de helado, los sólidos totales requeridos, el factor edulcorante de cada azúcar y el abatimiento combinado del

---

punto de congelación de los azúcares en solución deben ser calculados para lograr un contenido apropiado de sólidos, un nivel apropiado de dulzor y un grado de endurecimiento satisfactorio (Goff, 2011a; Tait *et al.*, 2003). En algunos helados, se ha demostrado que la adición de sacarosa a la mezcla conduce a una concentración en la fase proteica y dilución en la fase del estabilizante (Schorsch *et al.*, 2000).

#### **3.4.4. Estabilizantes.**

Los estabilizantes son un grupo de ingredientes a los cuales se les conoce también como coloides, hidrocoloides y gomas. Estos son macromoléculas, mayoritariamente polisacáridos, que son capaces de interactuar con el agua e indirectamente, con proteínas y lípidos en la mezcla. A pesar de ser empleados en muy baja concentración en la formulación, estos proveen funciones específicas y de suma importancia al producto final. Dentro de los diversos factores que influyen la textura y la aceptabilidad de un helado, el uso de estabilizantes es uno de los más relevantes. Sus propósitos principales son: incrementar la viscosidad de la mezcla, producir suavidad en el cuerpo y la textura del producto congelado, retardar el crecimiento de cristales de hielo o lactosa durante el almacenamiento y mantener los ingredientes en una suspensión uniforme (Bahramparvar & Mazaheri, 2011; Goff, 2011a).

##### **3.4.4.1. Tipos de estabilizantes.**

Una gran variedad de sustancias se han utilizado como estabilizantes en la elaboración de helado. La gelatina fue uno de los primeros materiales usados, pero hoy en día ha sido reemplazada por mezclas de dos o más polisacáridos descritos a continuación.

##### ***Carboximetilcelulosa (CMC).***

La CMC es una goma natural modificada químicamente. Se deriva de la celulosa de las plantas. La celulosa se conforma de varios monómeros de glucosa pero no es digerible por los humanos ni es soluble en agua. Para hacerla soluble y útil como ingrediente alimenticio se modifica agregando grupos laterales, tales como los grupos carboximetil que abren la estructura del

---

polímero. Como la CMC está cargada, se neutraliza con un ion sodio. La CMC purificada es un polvo blanco amarillento inodoro e insípido. Se disuelve en agua fría o caliente y es estable en un rango de pH de 5–10, pero la acidificación debajo de un valor de pH de 5 reduce la viscosidad y la estabilidad excepto en los casos especiales de tipos de CMC estables al ácido. La CMC funciona como espesante, estabilizante, aglutinante, formador de película y agente suspensivo. Por si sola, forma geles débiles, pero gelifica bien en combinación con  $\kappa$ -carragenina, goma de algarrobo o goma guar. Se considera un estabilizante fuerte y solamente se requiere de 0.1–0.2% en la mezcla para helado (Bahramparvar & Mazaheri-Tehrani, 2011; Glicksman, 1982; Igoe, 2011).

### ***Goma guar.***

La goma guar es extraída de las semillas de una legumbre tropical llamada guar (*Cyamopsis tetragonolba*). Se dispersa en agua fría y forma soluciones viscosas que cuando se calientan incrementan su viscosidad. Una solución del 1% tiene un rango de viscosidad entre 2,000–3,500 cP a 25°C. Esta sustancia se considera como un estabilizante fuerte, por lo que se usa generalmente en las mezclas para helado en concentraciones que van desde 0.1 al 0.2% (Kilara & Chandan, 2008).

### ***Goma de algarrobo.***

La goma de algarrobo es obtenida de las semillas del árbol *Ceratoni siliqua*. Es un estabilizante fuerte que provoca separación de fases y las dosis usadas van de 0.1-1%. Es parcialmente soluble en agua fría y debe ser calentado arriba de 85°C para que se hidrate completamente. Puede hacer que los geles de agar o carragenina sean más elásticos. Entre sus funciones en la mezcla para helado se encuentran la creación de una alta viscosidad uniforme que no se reduce por agitación, la capacidad de enfriarse uniformemente para permitir una mejor IA, no produce propiedades de enmascaramiento de sabor y forma un gel que puede ser efectivo para crio-protección (Bahramparvar & Mazaheri-Tehrani, 2011; Clarke, 2004; Igoe, 2011).

### ***Carragenina.***

Este estabilizante se deriva de las algas rojas *Chondus crispus*, *Kappaphycus alarezii* y *E. denticulatum*. Se clasifica principalmente como kappa, iota y lambda carragenina. El extracto de

---

*Kappaphycus alarezii* es casi kappa carragenina pura (menos del 10% es iota carragenina), mientras que el extracto de *E. denticulatum* es relativamente pura iota carragenina (menos del 15% de kappa). La característica de los geles de kappa es que son quebradizos y presentan sinéresis mientras que los de iota son más elásticos y no presentan sinéresis (Bixler *et al.*, 2001; Igoe, 2011). La  $\kappa$ -carragenina se agrega comúnmente a la mezcla como un estabilizante secundario a niveles menores a 0.05% para controlar la separación de fase (Vega & Goff, 2005). Para que exista este control la  $\kappa$ -carragenina se absorbe en las micelas de caseína formando una red de gel, lo cual produce la sedimentación de las caseínas cuando esta está en la conformación helicoidal. Esto conduce a una separación de fases entre polisacáridos y caseínas y a una rápida inhibición de la separación de fase en la mezcla por la capacidad que tiene la  $\kappa$ -carragenina de formar enlaces con las caseínas (Langendorff *et al.*, 2000; Spagnuolo *et al.*, 2005; Thaiudom & Goff, 2003).

#### **3.4.5. Emulsificantes.**

Los emulsificantes, también llamados surfactantes o agentes de superficie activa, son especies químicas con una naturaleza polar-no polar, con tendencia a localizarse en la interfase formando una capa mono-molecular adsorbida en ésta, entre las fases hidrofílica e hidrofóbica. Esta ubicación impide el tráfico de moléculas que van de la superficie al interior de líquido en busca de un estado de menor energía, disminuyendo la tensión superficial y produciendo así un coloide estable entre dos líquidos no miscibles naturalmente. Los emulsificantes son incluidos en las formulaciones porque mejoran la IA en la mezcla, producen un helado más seco para facilitar el moldeado o empaquetado, proveen un cuerpo y textura más suave en el producto y generan un producto con buena resistencia al fundido, además de que desplazan a las proteínas de la interfase de aire, haciendo a los glóbulos de grasa más susceptibles a la coalescencia parcial (Goff, 2008; Goff, 2011a). A diferencia de las proteínas, los emulsificantes no forman una superficie viscoelástica ya que son más surfactantes que estas y forman una película adsorbida compacta. Esta película depende de la repulsión de cargas o del mecanismo Gibbs-Marangoni para estabilizar espumas y emulsiones. El mecanismo Gibbs-Marangoni requiere una difusión o migración rápida de emulsificante en la interfase para reducir los gradientes de concentración que pudieran elevarse en la superficie. El movimiento rápido de los emulsificantes adsorbidos arrastra la fase

---

continua asociada, esto reestablece la presencia de fluido entre las burbujas y previene la coalescencia (Fruhner *et al.*, 2000).

Existen muchos tipos de agentes emulsificantes, incluyendo mono y di-glicéridos, ésteres de sorbitán (como el polisorbato 80), fosfolípidos, diversas proteínas y algunos polisacáridos, (Blanco-Salgado & Maldonado-Hernandez, 2011). De los agregados ex profeso para estabilizar las emulsiones lácteas, los primeros son los más empleados en formulaciones de helado. Los mono y di-glicéridos se derivan de la hidrólisis parcial de las grasas de origen animal o vegetal seguida por una re-esterificación con un exceso de glicerol. Para su uso en la elaboración del helado, los mono y diglicéridos generalmente contienen un porcentaje mayor al 40% de  $\alpha$ -monoglicérido, ya que esta es la forma anfifílica por excelencia y por lo tanto tiene una mejor funcionalidad. La porción del diglicérido es significativamente soluble en grasa por lo que contribuye en menor cantidad a la funcionalidad (Barford *et al.*, 1991).

### **3.5. Elaboración del helado.**

El proceso de elaboración del helado se puede dividir en dos fases: elaboración de la mezcla y congelación. Para elaborar la mezcla se siguen las siguientes operaciones: se incorporan y combinan los ingredientes, se pasteuriza la mezcla, se homogeneiza y se deja madurar por al menos 4 horas a una temperatura alrededor de los 4 °C. En la fase de congelación, la mezcla es vaciada en un congelador de superficie raspada donde cerca del 50% del agua es congelada y además se incorpora aire al producto. Después se llenan los contenedores y se envían a endurecimiento hasta que el centro alcanza la temperatura apropiada, generalmente -18 °C. El producto final es almacenado entre -18 y -30 °C dependiendo de su destino final (Goff, 2011a; Hartel, 2010). Una descripción individual de las operaciones más relevantes se incluye a continuación.

#### **3.5.1. Mezclado.**

El primer paso de la elaboración es el mezclado de los ingredientes. En este paso los ingredientes se colocan en un recipiente y se les aplica un esfuerzo cortante mediante agitación a

---

la vez que el producto es calentado. El mezclado se realiza antes del pasteurizado para minimizar el daño térmico de los ingredientes que no se hayan incorporado correctamente. El orden de adición de los ingredientes es importante porque esto puede afectar la calidad general del helado (Marshall, 2003a).

Los ingredientes líquidos (agua, leche, crema, etc.) son agregados primero y el calentamiento y la agitación comienza, además de que las grasas sólidas son derretidas antes de adicionarse. Enseguida se añaden los ingredientes secos (azúcar, estabilizantes, leche en polvo, etc.) (Clarke, 2004). Todos los ingredientes secos deben ser añadidos antes de que la temperatura alcance los 50°C para asegurar que los ingredientes sean dispersados equitativamente a través del sistema y para permitir que el recipiente alcance las temperaturas adecuadas para cada ingrediente (Marshall *et al.*, 2003).

Algunos ingredientes secos, especialmente las gomas y los emulsificantes, requieren ser previamente mezclados con azúcar para permitir una mejor hidratación y prevenir la formación de aglutinados cuando son agregados a los ingredientes líquidos (Marshall, 2003a). La leche y el suero en polvo también son agregados lentamente para prevenir la formación de aglutinados. Una vez que todos los ingredientes han sido agregados, la mezcla debe de ser homogénea y la temperatura debe ser igual o mayor a 65°C. Las fuerzas de corte del agitación producen una emulsión gruesa de aceite/agua con partículas relativamente grandes (10 µm aproximadamente) (Clarke, 2004).

### **3.5.2. Pasteurización.**

La pasteurización es el proceso en donde el calor es usado con el propósito de reducir los riesgos a la salud asociados a los microorganismos patógenos que se encuentran comúnmente en los productos lácteos. La pasteurización se utiliza para inactivar específicamente al patógeno más termorresistente (*Coxiella burnetti*) y con ello asegurar la eliminación de otros patógenos relevantes en leche incluyendo *Mycobacterium tuberculosis*, *Campylobacter jejuni*, *Salmonella* spp, *Listeria monocytogenes* y *Escherichia coli* O157:H7. *Listeria monocytogenes* es uno de los patógenos a los que se pone especial atención en el helado, ya que los ingredientes como el azúcar pueden protegerlos haciendo que sea más difícil destruirlos o inactivarlos (Lewis & Heppell, 2000).

---

Existen dos tipos principales de pasteurización usadas para mezcla de helado, la pasteurización en lote y la pasteurización HTST. La pasteurización en lote, también conocida como pasteurización LTLT, se hace en un recipiente grande en donde los ingredientes se agregan y son calentados a una temperatura mínima de 69°C por 30 minutos. Este tipo de pasteurización requiere tiempos de procesado largos, pero esto puede reducir el sabor a cocido en la mezcla y además incrementa la hidratación de las proteínas y los estabilizantes, lo cual mejora la textura, incrementa la resistencia al choque térmico y reduce el tiempo necesario de madurado (Marshall *et al.*, 2003). El método de pasteurización más utilizado es el de HTST el cual tiene como ventajas el ser un método continuo y que además permite la regeneración de una gran proporción del calor empleado. La pasteurización HTST utiliza un intercambiador de calor de placas que permite que una gran cantidad de líquido pueda fluir a través de él. Este tipo de pasteurización calienta la mezcla a 79°C por al menos 15 segundos. Su principal ventaja es su habilidad para calentar y enfriar la mezcla rápidamente y sumado a su proceso de regeneración permite que el producto se caliente y enfríe solo, lo cual reduce los costos de energía (Lewis & Heppell, 2000).

Se han implementado estándares federales para la pasteurización porque se considera crítica para la salud del consumidor y por lo tanto son monitoreados de cerca por agencias locales y federales (Goff & Hartel, 2013). Para el caso de México, la mezcla para helados debe pasteurizarse utilizando una temperatura de 68.5°C durante un tiempo de 30 minutos o, a una temperatura de 79.4°C durante un tiempo mínimo de 25 segundos o, someterla a otra relación de tiempos y temperaturas cuyo efecto sea el mismo. En cualquiera de los casos una vez alcanzados respectivamente las temperaturas y tiempos señalados se enfriará bruscamente a 4°C (NOM-036-SSA1-1993).

### **3.5.3. Homogeneización.**

El objetivo principal de la homogeneización es promover la formación de una dispersión coloidal estable y uniforme al reducir el tamaño de los glóbulos de grasa a magnitudes menores a los 2  $\mu\text{m}$  (Lucas *et al.*, 2005). Cuando una mezcla es homogeneizada adecuadamente, la grasa no crema ni el producto congelado tiene una apariencia o sabor grasoso (Goff & Hartel, 2013).

---

Los homogeneizadores pueden ser de una o dos etapas. En un homogeneizador de una etapa, los glóbulos de grasa son forzados a pasar a través de una válvula muy pequeña a una presión aproximada de 13.8 MPa y por lo mismo se dividen en partículas más pequeñas. Sin embargo, estas partículas se pueden aglomerar nuevamente y regresar al tamaño original antes de la homogeneización. Con la segunda etapa que se realiza a una presión aproximada de 3.45 MPa, los glóbulos de grasa que se aglomeran son forzados a romperse nuevamente para obtener un glóbulo más uniforme y reducir la viscosidad (Lewis & Heppell, 2000). La homogeneización es más efectiva a temperaturas arriba de 60°C y es por esto que la mayoría de homogeneizadores están conectados al pasteurizador, así cuando el producto sale de la sección de calentamiento, la mezcla está a la temperatura adecuada para el rompimiento de los glóbulos (Marshall, 2003a). Al homogeneizar la mezcla para helado el área de superficie aumenta, exponiendo más de la membrana del glóbulo graso y promoviendo más desestabilización al disminuir la tensión interfacial del glóbulo (Goff, 1997a).

Las homogeneización genera una mayor área superficial expuesta del glóbulo, mejorando la textura porque los glóbulos son más uniformes, permite una mejor digestibilidad de la grasa, mejora la desestabilización de la grasa, promueve la estabilidad de la espuma y provee una textura general más suave. Una de las desventajas de la homogeneización es que existe una mayor área de grasa expuesta, la cual es más susceptible a la acción enzimática y a la luz lo que puede ocasionar el desarrollo de colores y sabores extraños (Spreer, 1998).

#### **3.5.4. Madurado.**

Comúnmente la mezcla para helado se madura a temperaturas menores a 4°C por 4 -24 h; se lleva a cabo inmediatamente después del pasteurizado y la homogeneización ya que estos procesos cambian la forma física de los sólidos suspendidos en la mezcla. La maduración es un proceso importante porque permite que la grasa se cristalice lo cual ayuda a la coalescencia parcial (ver sección 3.6) (Goff & Hartel, 2013). La cristalización de la grasa en el estado emulsificado ocurre más lentamente que en el estado no emulsificado. La velocidad de cristalización de la grasa depende del tipo de grasa y emulsificante usados, pero generalmente se requiere de al menos 4 h para una cristalización completa. Durante este tiempo los emulsificantes desplazan a las proteínas hacia la interfase del glóbulo de grasa (Adleman & Hartel, 2001).

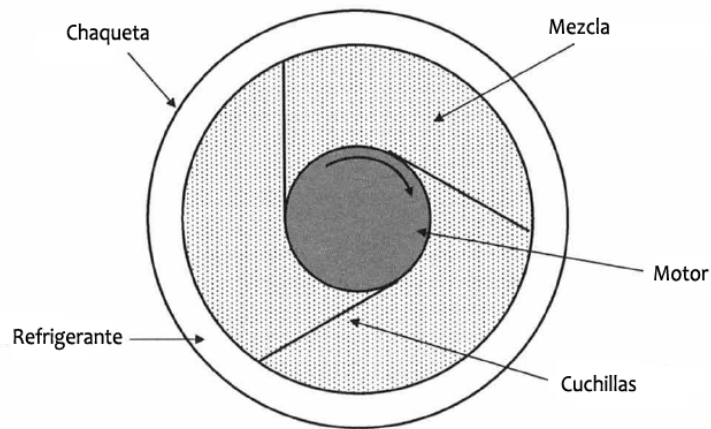
---

Por otra parte, algunos de los hidrocoloides y proteínas requieren tiempo para una hidratación completa y así proveer un incremento significativo en la viscosidad. Generalmente 4 h son suficientes para que estos cambios ocurran y es importante esperar este tiempo ya que si la mezcla no madurada se bate conduciría a un helado con características similares a las encontradas en mezclas no emulsificadas, tales como una menor retención de forma y un fundido rápido debido a una desestabilización no óptima de grasa durante su congelamiento. Las bajas temperaturas utilizadas durante la maduración son importantes para asegurar un mínimo crecimiento microbiano durante el almacenado de la mezcla después de la pasteurización (Marshall *et al.*, 2003).

### **3.5.5. Congelado.**

El congelado es el proceso en el cual se forman los cristales de hielo, se desestabiliza la grasa y se incorpora aire a la mezcla. Este proceso se puede llevar a cabo en congeladores continuos o de lote. En cualquiera de los casos, la mezcla entra en un congelador que es enfriado con refrigerante en donde se bate por medio de un motor que hace girar las cuchillas incorporadas a este (Figura 1). Los cristales de hielo se forman en la superficie interna del congelador de donde son raspados por las cuchillas para servir como núcleos de cristalización, coadyuvando a ayudar a formar la textura del helado (Marshall, 2003a).

La mezcla entra al proceso de congelado ligeramente arriba de su punto de congelación por lo que se debe remover primero el calor sensible para poder convertir el agua en cristales de hielo. A medida que los cristales son formados están sujetos a la nucleación o migración del agua para formar cristales más grandes. Conforme el agua se congela, los otros aditivos se congregan lo cual ayuda a reducir el punto de congelamiento de la mezcla debido a que los calores latente y sensible son eliminados. Por esta razón siempre habrá una parte sérica que no se congelara. Generalmente el helado se retira del congelador cuando el 50% del agua se ha convertido en hielo (Goff, 1997a).



**Figura 1.** Esquema de un congelador de superficie raspada. Adaptado de Clarke (2004).

### 3.5.6. Endurecimiento.

Una vez que el helado es removido del congelador y es envasado en los contenedores, se lleva inmediatamente a una cámara de congelamiento donde se lleva a cabo el proceso de endurecimiento. En esta etapa el helado es enfriado a temperaturas entre  $-18$  y  $-30^{\circ}\text{C}$ . Esto permite un congelado rápido, lo que produce cristales de hielo más pequeños aun cuando la nucleación no continua esté ocurriendo (Marshall *et al.*, 2003).

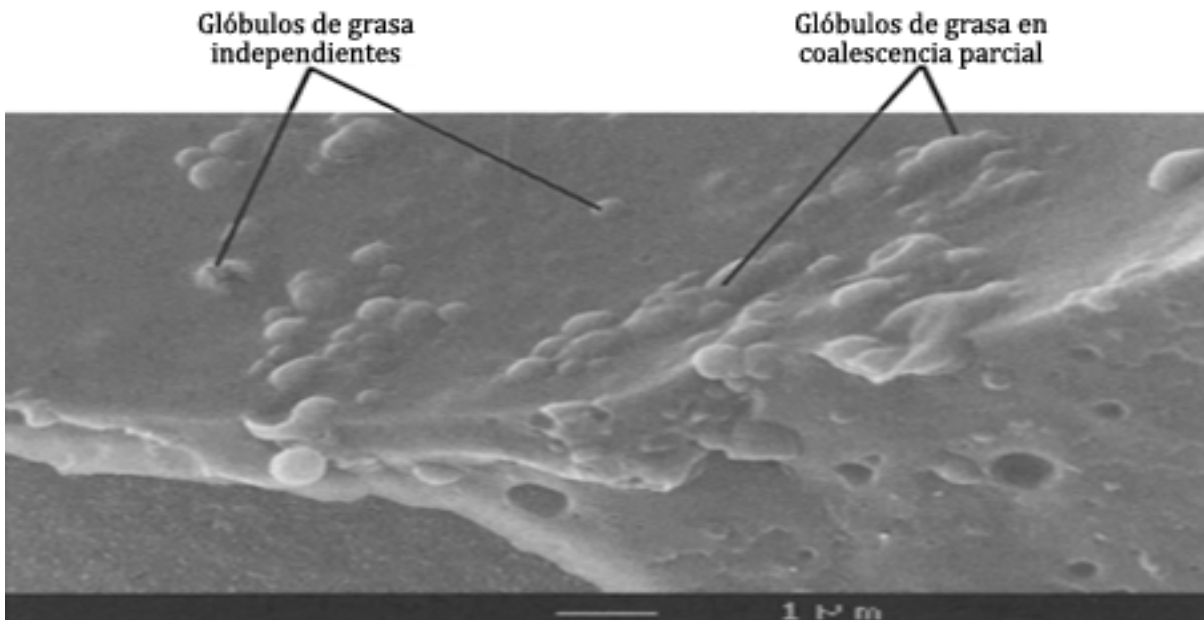
Los cristales de hielo crecen durante el endurecimiento de dos maneras, por propagación y por recristalización. La propagación es simplemente el incremento en tamaño de todos los cristales a medida que el agua se congela. La recristalización es el proceso en el cual los cristales grandes crecen a expensas de los cristales pequeños, por lo tanto hay un incremento en el tamaño medio del cristal pero no un cambio en la cantidad de hielo (Clarke, 2004). Entre más baja es la temperatura de almacenamiento, la difusión de las moléculas de azúcar y agua en la matriz alimenticia es más lenta y por consiguiente la recristalización también se ralentiza. Para asegurar que domina la propagación sobre la recristalización, el endurecimiento debe ser lo más rápido posible. Además es importante que haya una mínima fluctuación de temperatura para así reducir la recristalización que pueda ocurrir durante los ciclos de congelado-descongelado (Goff, 2011a).

---

### 3.6. Microestructura del helado.

A nivel molecular la manera en que los componentes interactúan unos con otros en la interfase influye la formación y la estabilidad de las partículas individuales y la interacción entre ellas. Por lo tanto, es importante saber cómo las características macroscópicas se pueden mejorar al controlar la formación nanoestructural en las interfases de los fluidos (Rodríguez-Patino *et al.*, 2008).

Un factor importante a considerar es el papel que juega la membrana del glóbulo de grasa en la estabilidad de la emulsión. Cuando una emulsión aceite/agua se somete a una fuerza de corte y la membrana entre dos glóbulos de grasa colindantes se rompe, estos se agrupan causando la pérdida de identidad de la partícula original creando una más grande; este fenómeno es conocido como coalescencia. La coalescencia se ve favorecida cuando las burbujas de aire se acercan unas a las otras por movimiento browniano. Generalmente las burbujas mayores a 20  $\mu\text{m}$  se ven involucradas en la coalescencia ya que tienen un área interfacial mayor. (Goff, 1997b; Sofjan & Hartel, 2004).

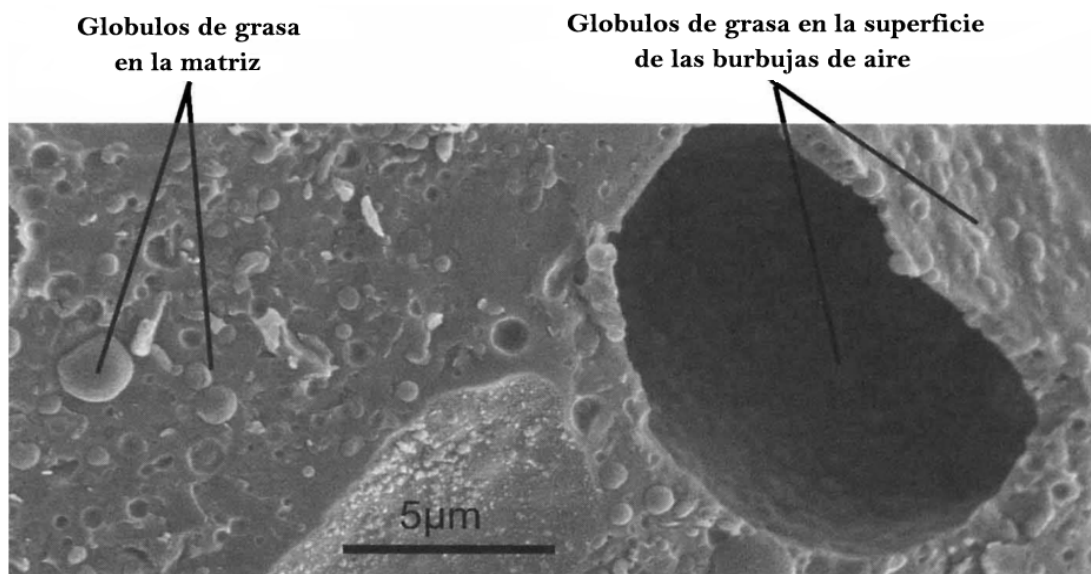


**Figura 2.** Coalescencia parcial en glóbulos de grasa. Adaptada de Clarke (2004).

---

Algunas de las emulsiones lácteas comúnmente ocupadas en las industrias se almacenan a temperaturas en las que la cristalización ocurre, en consecuencia muestran patrones de cristales dentro de sus glóbulos de grasa (Boode *et al.*, 1991). Si los cristales están presentes la coalescencia puede ser incompleta llevando a la formación de glóbulos irregularmente agregados que mantienen algo de su forma original pero están intrínsecamente unidos. A este proceso se le conoce como coalescencia parcial (Figura 2).

A causa de la forma irregular de los agregados, la viscosidad de la emulsión se puede incrementar (Boode *et al.*, 1993). A la grasa se le atribuye la estabilización de la estructura de la espuma cuando hay coalescencia parcial de ésta durante el batido, ya que los aglomerados de glóbulos de grasa son responsables de rodear y estabilizar las burbujas de aire creando una red semicontinua dentro del producto (Figura 3) (Goff, 1997a), como consecuencia de la acción emulsificante, la incorporación de aire (IA), la formación de cristales de hielo y las altas fuerzas de corte de las aspas del congelador (Goff & Hartel, 2013; Koxholt *et al.*, 2001). La combinación de aire y agitación produce coalescencia parcial extremadamente rápida.



**Figura 3.** Micrografía que muestra glóbulos de grasa en la matriz y en la superficie de las burbujas de aire. Adaptada de Clarke (2004).

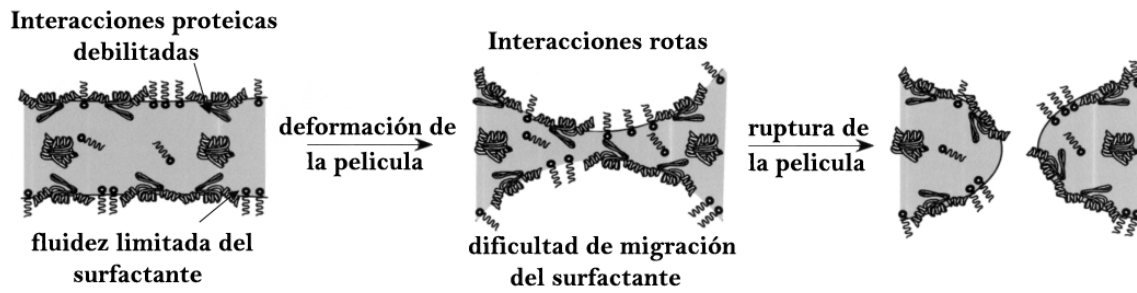
Después de precalentar o pasteurizar, la mezcla está a temperatura suficiente para fundir la grasa presente y cuando se somete a una homogeneización, los recién formados glóbulos de grasa

---

prácticamente carecen de membrana y adsorben rápidamente moléculas anfífilas de la solución, entre las cuales están las caseínas, proteínas de suero desnaturalizadas, fosfolípidos y componentes de la membrana de glóbulo original (Caldwell *et al.*, 1992). La membrana formada durante la homogeneización, continua desarrollándose durante la etapa de maduración y un reacondo ocurre hasta que se haya alcanzado el menor estado de energía posible (Barford *et al.*, 1991). Williams y Dickinson (1995) mostraron que la estabilidad de una emulsión aumentaba a medida que la concentración de proteína usada en la formación de la emulsión se incrementaba, esto debido a menores tamaños de glóbulo de grasa y a una mayor cantidad de proteína adsorbida en la interfase.

El enfoque más simple para entender la funcionalidad proteica es examinar las soluciones/dispersiones de una sola proteína (Foegeding & Davis, 2011). Sin embargo, cuando se agrega un ingrediente proteico a la mezcla para helado, por lo regular se está agregando más de una sola proteína. Las proteínas tienen la habilidad de interactuar con proteínas adsorbidas adyacentemente para formar películas interfaciales fuertemente viscoelásticas con propiedades de engrosamiento y permeabilidad de gases que son más resistentes a la coalescencia y proveen estabilización electrostática o estérica. Por lo tanto la funcionalidad debe de ser abordada en el contexto de proveer una funcionalidad general en el alimento más que un solo aspecto de toda la estructura (Lam & Nickerson, 2013; Wilde *et al.*, 2004).

Un aspecto importante que debe tomarse en cuenta es la interacción entre las proteínas y los emulsificantes. La razón de esto es porque aunque ambos pueden estabilizar espumas y emulsiones por su cuenta, sus mecanismos de estabilización son incompatibles y a menudo resultan en una desestabilización cuando los dos están presentes en la interfase. Este proceso es conocido como desestabilización competitiva (Figura 4). Como se explicó anteriormente las proteínas estabilizan las películas interfaciales formando fuertes interacciones; la presencia de emulsificantes dificultan estas interacciones y cuando la película se deforma, las interacciones ya no son lo suficientemente fuertes para mantener la estabilidad y la probabilidad de ruptura aumenta (Wilde *et al.*, 2004).



**Figura 4.** Desestabilización competitiva de las películas interfaciales estabilizadas proteicamente por efecto de los emulsificantes. Adaptada de Wilde *et al.* (2004).

La mayoría de los polisacáridos de interés comercial son incompatibles con las proteínas lácteas en solución, por lo tanto uno de los efectos que se presentan al usarlos es la separación de fases. La separación de fases provoca un cambio en el comportamiento funcional de las proteínas y los polisacáridos, la separación del suero y la pérdida de atributos de calidad en el producto (Schorsch *et al.*, 2000; Syrbe *et al.*, 1998; Thaiudom & Goff, 2003; Vega & Goff, 2005).

### 3.7. Características fisicoquímicas del helado.

El objetivo principal de la industria alimenticia es producir alimentos que tengan un impacto en el consumidor. En la escala macroscópica, muchos de estos productos son emulsiones y espumas. En esta escala las propiedades físicas como la estabilidad, la textura y las propiedades reológicas son de gran importancia.

#### 3.7.1. Propiedades reológicas.

La viscosidad es una de las propiedades reológicas más importantes de la mezcla para helado y es influenciada por su composición (principalmente por los estabilizantes y las proteínas), el tipo y la calidad de los ingredientes, el procesado y manejo de la mezcla, la concentración (contenido de sólidos totales) y la temperatura (Bahramparvar & Mazaheri-Tehrani, 2011). Una textura suave y una sensación refrescante son los atributos comúnmente

---

deseados en un helado y pueden ser provistos por una mezcla con las óptimas características reológicas (Dogan & Kayacier, 2007).

Muchos sistemas alimenticios muestran comportamientos entre líquidos y sólidos, por lo que a este fenómeno se le conoce como viscoelasticidad. Si la relación entre esfuerzo cortante y la velocidad de corte es lineal, es decir que la viscosidad es constante independientemente del esfuerzo aplicado, se dice que el líquido es newtoniano. Sin embargo, las mezclas para helado exhiben un comportamiento pseudoplástico no newtoniano, esto quiere decir que no hay una relación linear entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte, además de que la viscosidad aparente disminuye cuando la velocidad de corte se incrementa. La pseudoplasticidad ha sido relacionada a la incrementada alineación de las moléculas constituyentes del sistema (Farhoosh & Riazi, 2007). Aunque se comprende que la viscosidad de la mezcla es importante para impartir propiedades deseables al helado, los parámetros reológicos específicos requeridos no son entendidos completamente. Generalmente cuando la viscosidad aumenta, la resistencia al fundido y la suavidad de la textura aumenta pero la habilidad para batir la mezcla disminuye (Adapa *et al.*, 2000; Goff & Hartel, 2013).

Numerosos estudios han investigado las propiedades reológicas de los helados, de las mezclas y de los factores que influyen estas características (BahramParvar *et al.*, 2010; Kaya & Tekin, 2001; Kus *et al.*, 2005; Minhas *et al.*, 2002). Se ha reportado que el índice del comportamiento de flujo de las mezclas para helado está alrededor de 0.7 (Goff *et al.*, 1994), aunque se han encontrado valores en los rangos de 0.68-0.98 y 0.48-0.88 para los estabilizantes naturales goma guar y goma de algarrobo (en concentraciones de 0.05-0.4%) respectivamente (Cottrell *et al.*, 1980). En general, se han mostrado valores que van desde 0.37 hasta 0.98. El comportamiento de flujo dependiente del tiempo (tixotropía) de la mezcla para helado ha sido estudiado por (Kus *et al.*, 2005). Sus muestras mostraron un comportamiento ligeramente tixotrópico a medida que se incrementaba la concentración de salep (harina obtenida de los tubérculos de determinadas orquídeas). Las mezclas para helado mostraron comportamiento pseudoplástico después de la destrucción de la estructura tixotrópica. La caracterización de las propiedades reológicas dependientes del tiempo es importante para correlacionar los parámetros físicos con la evaluación sensorial.

---

Estudios previos han mostrado que un incremento en la concentración de estabilizantes y una reducción en la temperatura incrementan la pseudoplasticidad, mientras que un incremento en la temperatura tiende a acercar las mezclas a un comportamiento newtoniano (BahramParvar *et al.*, 2010; Farhoosh & Riazi, 2007). Soukoulis *et al.*, (2008) mostraron que la pseudoplasticidad de la mezcla para helado era un parámetro indicativo de la cremosidad y de la acuosidad de la mezcla, por lo tanto el uso de hidrocoloides mejoraba la cremosidad y disminuía la acuosidad. Se sabe que las soluciones de gomas con valores de  $n$  altos presentan una sensación limosa en la boca. Cuando una viscosidad alta y una buena sensación en la boca es buscada, se debe elegir una goma con un valor  $n$  bajo (Marcotte *et al.*, 2001).

### **3.7.2. Incorporación de aire.**

La característica física de los postres congelados que concierne mayormente a las agencias regulatorias es la del peso por unidad de volumen de producto. Esta se ve afectada directamente por la IA lograda en el producto. Cuando suficiente aire es batido en una mezcla durante el congelamiento causando el aumento de volumen al doble, se dice que una IA del 100% ha sido alcanzada. Las burbujas de aire contribuyen a la calidad sensorial y estética del helado ya que, la correcta cantidad de aire provee un cuerpo más suave y ligero; por el contrario, si se incorpora un exceso de aire, contribuirá a un cuerpo demasiado ligero. Se ha sugerido que el helado con una IA del 70% contiene suficiente aire para prevenir el crecimiento de cristales de hielo (E. *et al.*, 2010; Marshall, 2003b).

El incremento del volumen en el helado es uno de los roles del estabilizante, esto se logra a través del incremento en la viscosidad que hace que las burbujas de aire permanezcan (Goff & Hartel, 2013). Se ha demostrado que la estructura formada por las burbujas de aire es uno de los principales factores que influyen la velocidad de drenado, la retención de forma durante el fundido y las propiedades reológicas del helado derretido, las cuales están relacionadas a la cremosidad. La incorporación de burbujas de aire más pequeñas mejora la calidad del producto respecto a estos tres indicadores (Eisner *et al.*, 2005).

Chang & Hartel (2002b) analizaron los efectos de la formulación y las condiciones de operación en el desarrollo de las burbujas de aire. La concentración de estabilizante no tuvo efecto

---

en la IA. Sin embargo, la adición de estabilizante a la mezcla redujo el tamaño de las burbujas de aire comparada con una mezcla similar sin estabilizante. Los cambios en el tamaño de las burbujas de aire se pueden relacionar directamente a los cambios en las propiedades reológicas durante el batido. Cuando se inicia el batido, la viscosidad aparente se incrementa por la disminución en la temperatura, lo que causa una reducción en el tamaño máximo de las burbujas de aire debido al incremento en la velocidad de corte utilizada para romperlas.

Durante el almacenamiento del helado pueden ocurrir cambios en el tamaño de las burbujas de aire debido principalmente a tres mecanismos: la desproporción (maduración de Ostwald), coalescencia y drenado. Las velocidades a las que cambian los tamaños de las burbujas de aire basadas en estos mecanismos dependen de la temperatura de almacenamiento y de la formulación de la mezcla (cantidad de estabilizante y emulsificante). Una disminución en la temperatura de almacenamiento conduce a una disminución en la velocidad de crecimiento de las burbujas debido principalmente a que el mecanismo de drenado es inhibido, pero también porque las velocidades de desproporción y coalescencia se reducen. La adición de estabilizante a la mezcla inhibe el crecimiento de las burbujas de aire debido al incremento en la viscosidad en la fase fluida (Chang & Hartel, 2002a).

La desproporción, desarrollada por diferencias en la presión de Laplace entre burbujas, puede ser controlada incrementando la viscosidad en la fase sérica y formando una película gruesa en la superficie de las burbujas de aire. La desproporción se puede inhibir al agregar estabilizantes a la mezcla (Sopade & Kassum, 1992).

Dos defectos importantes en el helado son el encogimiento y la expansión y pueden estar relacionados con la adición de estabilizantes. El encogimiento se define como la pérdida de volumen en el helado antes de que el producto sea removido del envase (Dubey & White, 1997). La expansión del producto se presenta en el área de almacenaje o después de transportar el helado cuando se observan las tapas de los envases infladas. Ambos problemas son relacionados al uso de diferentes fuentes de proteínas, productos bajos en grasa, el incremento en la práctica de producir helados con muy altos niveles de IA y a la amplia distribución geográfica del producto debido a cambios de altitud o transporte aéreo (Dubey & White, 1997; Goff & Hartel, 2013).

---

### 3.7.3. Velocidad de drenado.

La resistencia al fundido en el helado es debida parcialmente al aire incorporado y como la conductividad térmica del aire es mucho menor, esto lleva a una baja conductividad térmica total en el helado, además de que el aire actúa como aislante en el sistema (E. *et al.*, 2010).

Las burbujas de aire ascienden rápidamente en la espuma debido a la gran diferencia entre la fase continua y el gas y a la tendencia de las burbujas a ser grandes. Las proteínas tienden a contribuir menos a la viscosidad de la fase continua y más a proveer la mayor resistencia posible al cremado al formar un red que inmovilice las burbujas de aire. La coalescencia de las burbujas representa un proceso de adelgazamiento y ruptura de las películas líquidas que separan a dos burbujas vecinas. Los factores principales que controlan la estabilidad de la espuma contra la coalescencia son las fuerzas coloidales superficiales, la adsorción de moléculas surfactantes, la fuerza que presiona una burbuja contra otra, el diámetro de película, etc. La habilidad de las proteínas para formar películas fuertes y elásticas en la interfase previene su ruptura (Marinova *et al.*, 2009).

En las espumas, las proteínas se encuentran localizadas en la fase continua y en la interfase y cuando estas son formadas, contribuyen al adsorberse en la interfase aire/agua formada, disminuyendo la tensión interfacial y alterando la viscosidad de la fase continua (Marinova *et al.*, 2009). En el caso de la mezcla para helado, las propiedades emulsificantes de las proteínas en la mezcla surgen de su adsorción en los glóbulos de grasa en la homogeneización (Goff, 2011a). Una velocidad de adsorción rápida de las proteínas produce una espuma más estable. Una vez formada la espuma, las proteínas pueden contribuir a la prevención de los subsecuentes mecanismos de desestabilización de esta por varios medios (Murray, 2007; Rodríguez-Patino *et al.*, 2008).

### 3.7.4. Textura.

La textura del helado es una de sus cualidades más importantes. Ésta es la manifestación sensorial de la estructura. Mientras que el proceso dinámico de congelado se asocia generalmente

---

con la formación de la fase de hielo, la integración de aire y la agitación durante este proceso, son responsables de los aspectos coloidales de la estructura, específicamente en la formación de las burbujas de aire y en la coalescencia parcial de la grasa (Fellows, 2000). Un elemento importante de la textura es la percepción de como la estructura se va rompiendo durante la masticación. Esto implica la necesidad de construir estructuras con patrones específicos de rompimiento. Una vez que los enlaces entre la estructura del alimento y el placer sensorial se han establecido, es factible que una estructura deseada pueda ser formada por un rango de moléculas y procesos. Esto permitirá la manipulación de la composición y al mismo tiempo mantendrá el nivel deseado de calidad en el alimento (Norton & Norton, 2010).

Generalmente la textura en el helado se expresa como la firmeza instrumental, esta puede ser usada como una medida del crecimiento de los cristales de hielo. El incremento de los cristales de hielo durante el almacenamiento del helado es acompañado por grandes valores de firmeza instrumental. Sin embargo, también puede reflejar el impacto de los ingredientes (grasa, azúcar, proteínas e hidrocoloides) y las condiciones de procesamiento (homogeneización, madurado y congelado) en el producto final (Muse & Hartel, 2004).

### **3.7.5. Recristalización.**

Los mecanismos por los cuales los estabilizantes afectan las propiedades congelantes o limitan la recristalización han sido estudiados extensivamente pero aun no son entendidas completamente. Los estabilizantes tienen un impacto pequeño o nulo en la distribución de tamaño inicial de los cristales de hielo en el helado durante el batido y el almacenado (Flores & Goff, 1999). Sin embargo, limitan la velocidad de crecimiento de los cristales de hielo durante la recristalización (Kouassi *et al.*, 2002). El efecto crio-protector de los hidrocoloides en el helado restringe la difusión del agua y los solutos dentro de sus redes estructurales. Además, retiene agua libre alrededor de la estructura del polisacárido. Se ha encontrado que la velocidad de recristalización se incrementa al aumentar los coeficientes de autodifusión del agua en la matriz concentrada por congelamiento de las soluciones de azúcar (Hagiwara *et al.*, 2006; Patmore *et al.*, 2003).

La separación de fases debido a la incompatibilidad de los hidrocoloides con las proteínas puede contribuir a retardar la recristalización (Regand & Goff, 2002). Goff *et al.* (1999)

---

encontraron que la formación de las redes de goma de algarrobo combinadas con la presencia de separación de fases por proteínas era efectiva para controlar la recristalización. Algunos autores reportan que los polisacáridos estabilizantes que se usan comúnmente para controlar la recristalización incluyen a la goma de algarrobo, CMC, alginatos, carragenina y goma xantana (Hagiwara & Hartel, 1996; Miller-Livney & Hartel, 1997). La goma de algarrobo ha mostrado que reduce la velocidad de recristalización mejor que la goma guar probablemente debido a diferencias en sus estructuras (Patmore *et al.*, 2003).

Se ha reportado que los estabilizantes que no forman geles tienen efectos retardantes en el crecimiento de los cristales de hielo (Goff, 2002; Regand & Goff, 2002). El hecho de que algunos de estos estabilizantes no gelificantes (goma xantana, CMC, alginatos) fueron más efectivos retardando la recristalización que los estabilizantes que forman geles (gelatina, carragenina, goma de algarrobo) sugiere que el bloqueo estérico de la interfase o la inhibición del transporte del soluto hacia y desde la interfase del hielo causada por la gelificación de los polímeros, no es el único mecanismo de acción estabilizante. La capacidad de retención de agua de los estabilizantes y proteínas probablemente causa una reducción en la movilidad del agua en el sistema, promoviendo los mecanismos de recristalización. Estos mecanismos dan como resultado la conservación del tamaño de cristal de hielo (Regand & Goff, 2003).

### **3.8. Ultrasonido.**

#### **3.8.1. Definición y método de acción.**

El US se define como ondas sonoras que tienen una frecuencia que excede el límite de audición del oído humano. Estas ondas viajan a través de la masa del material o en su superficie a una velocidad que es característica de la naturaleza de la onda y el material a través del cual se está propagando (Soria & Villamiel, 2010). Para llevar a cabo satisfactoriamente el procesamiento con US, se deben optimizar un cierto número de parámetros tales como la frecuencia, la longitud y la amplitud de onda, la potencia, la intensidad, la temperatura, el tiempo de tratamiento y la matriz alimenticia, además de la cantidad de gas y/o aditivos contenidos en el medio. Estos parámetros deben ser estudiados cuidadosamente ya que pueden afectar positiva o negativamente el proceso (Pingret *et al.*, 2013).

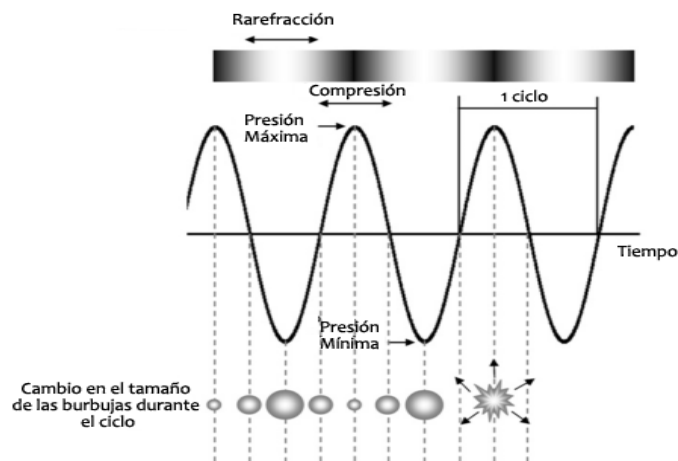
---

La intensidad es la cantidad de potencia disipada en un medio líquido por unidad de área de superficie del sonotrodo. (Patist & Bates, 2008; Sutkar & Gogate, 2009). Dependiendo de la intensidad y la frecuencia de los tratamientos, la aplicación del US en la tecnología alimenticia se puede dividir en dos categorías: US de baja energía (alta frecuencia-baja intensidad) y US de poder (baja frecuencia-alta intensidad). El US de baja energía tiene frecuencia mayores a 100 kHz e intensidades menores a 1 W/cm<sup>2</sup> por lo que puede ser utilizado para análisis no invasivos y para obtener información de las propiedades fisicoquímicas del alimento como la firmeza, maduración, contenido de azúcar y acidez, con el fin de monitorear los materiales alimenticios durante su proceso y almacenamiento para asegurar su calidad y seguridad (Demirdöven & Baysal, 2008). El US de poder utiliza intensidades mayores a 1 W/cm<sup>2</sup> y frecuencias entre 20 y 100 kHz, las cuales son destructivas e inducen efectos en las propiedades físicas, mecánicas o químicas de los alimentos debidas a la cavitación (Awad *et al.*, 2012).

La cavitación es un fenómeno de nucleación, crecimiento y subsecuente colapso de las microburbujas contenidas en un medio líquido debido a la propagación del US a través de un material biológico, generando compresiones y descompresiones (rarefacción) de las partículas del medio (Figura 5), y resultando en la generación de temperaturas y presiones locales altas (de 1,000-15,000 K y 500-5,000 bar respectivamente) en millones de puntos dentro del reactor (Mason, 1998). Además de estos efectos también se le atribuyen fuertes corrientes acústicas, fuerzas de corte altas cercanas a la superficie de la burbuja, formación de micro-corrientes cerca de la superficie sólida (debido al colapso asimétrico de las burbujas), generación de radicales libres altamente activos y turbulencia (Young, 1999). Estos efectos pueden ser utilizados para la intensificación del procesamiento físico y químico tales como la síntesis química (aceleración de la velocidad de reacción, incremento del rendimiento, reducción en el tiempo de inducción, cambios en el modo de reacción para tener una mejor selectividad), el tratamiento de aguas residuales (degradación de complejos químicos), procesos textiles (mejorar los procesos de entintado), biotecnología (homogeneización, desinfección de agua y rompimiento de las células para la liberación de enzimas intracelulares), cristalización, química polimérica (degradación de polímeros e iniciación de reacciones), extracción y emulsificación entre otras (Gogate, 2008). Se ha observado que la actividad cavitacional en un reactor no es uniforme. Para los tratamientos con bajas frecuencias, la energía máxima se disipa cerca de la superficie irradiada formando una especie de cono. Debido a esto, hay una máxima actividad cavitacional cerca de la superficie

---

irradiada y amplias variaciones en la velocidad de disipación de la energía en el líquido restante (Mason *et al.*, 2005).



**Figura 5.** Cavitación ultrasónica. Adaptada de Soria & Villamiel (2010).

En un medio líquido homogéneo, la pérdida de energía debida a la dispersión es usualmente despreciable y la absorción de las ondas sonoras da como resultado cambios en la conductividad térmica, la viscosidad y otros procesos moleculares. Esta transferencia de energía resulta en un incremento de temperatura en el medio, aunque las temperaturas alcanzadas son generalmente debajo de los 70°C dependiendo de las condiciones de operación y del sustrato (Villamiel & de Jong, 2000). El incremento en la temperatura puede ser utilizado para proveer información cuantitativa acerca de la actividad cavitacional. Los cambios en la temperatura del medio también se pueden usar para obtener información acerca de la cantidad total de energía que entra en el medio, por lo que ha sido ampliamente utilizada para medir la eficacia de los reactores sonoquímicos en términos de transferencia de energía (Hallez *et al.*, 2007).

La presencia de partículas sólidas provee núcleos adicionales para el fenómeno de la cavitación, por lo tanto se aumenta el número de eventos ocurridos en el reactor resultando en una mejora de la actividad cavitacional. Además del efecto positivo en la cavitación, el contenido de sólidos también tiene un efecto negativo, ya que las partículas sólidas contribuyen a la dispersión de las ondas sonoras, por lo tanto la energía transferida al sistema disminuye (Gogate *et al.*, 2006).

---

Como ya se mencionó, la cavitación es capaz de formar radicales en un medio líquido lo cual puede repercutir en la degradación de los productos a través de reacciones deteriorativas en cadena. Estos radicales, por otra parte, pueden tener aplicaciones beneficiosas, dado que son usados para promover reacciones que incluyen síntesis de nanomateriales, polímeros, degradación de contaminantes orgánicos, entre otros (Ashokkumar, 2011). Los radicales son formados a partir de la sonólisis del vapor de agua, que se encuentra en las burbujas de gas y se disocia al implotar, durante la cual se generan radicales hidrógeno y oxidrilo, estos últimos en mayor cantidad (Fang *et al.*, 1996).

### **3.8.2. Aplicaciones en los alimentos.**

Esta tecnología emergente ha sido utilizada sola o combinándola con calor moderado (TS) como alternativa a las operaciones convencionales de procesamiento de alimentos para controlar la microestructura y modificar la textura de los productos grasos, emulsificarlos, modificar las propiedades funcionales de las diferentes proteínas de los alimentos, inactivación o aceleración de actividad enzimática para mejorar la vida de anaquel y la calidad de los productos, inactivación microbiana, congelamiento, secado y extracción de varios componentes bioactivos de los alimentos (Awad *et al.*, 2012).

Los tratamientos con US pueden tener efectos letales en los microorganismos cuando son aplicados con suficiente intensidad (frecuencias arriba de 18 kHz) aunque algunos reportes muestran inactivación microbiana con frecuencias tan bajas como 14 kHz, cuando las frecuencias más comúnmente usadas son 20 y 24 kHz. Sin embargo, ha sido mostrado que el US por sí mismo no es suficiente para reducir las poblaciones microbianas deseadas (Bermúdez-Aguirre *et al.*, 2011). Algunos estudios han mostrado la influencia de la temperatura y la presión sobre la letalidad del US en bacterias patógenas. Vijayakumar (2012) encontró que la TS era capaz de causar una reducción mayor al 99% en el conteo bacteriano total, además de reducir la actividad de la proteasa del *Staphylococcus aureus*. En el caso de la bacteria *Yersinia enterocolitica*, aunque el US tiene un efecto letal bajo a temperatura ambiente, se observó que el nivel de letalidad aumenta cuando se incrementa la temperatura (Awad *et al.*, 2012). Para el caso de la bacteria *E. coli*, se observó una inactivación mejorada cuando se utilizó US de poder con calor. Similarmente,

---

un efecto sinérgico se mostró con la TS en la inactivación de *Salmonella seftenberg* (Lee *et al.*, 2009).

Los cambios de color en un alimento pueden afectar la aceptación del producto por parte de los consumidores. Teniendo esto en cuenta, se han realizado investigaciones sobre el efecto del US en el color de alimentos sólidos y líquidos. Efectos del tratamiento con US en jugo de tomate, piña, uva y arándano se han llevado a cabo, encontrándose modificaciones en el color atribuibles a una reducción de carotenoides por isomerización (Adekunte *et al.*, 2010; Bermúdez-Aguirre & Barbosa-Cánovas, 2012). Por otra parte, se ha comparado la elaboración de mayonesa por procedimientos convencionales y con tratamientos de US. Los resultados muestran un color más blanco para el tratamiento con US, debido posiblemente a un tamaño de partícula menor (Patist & Bates, 2008).

El uso de tratamientos de US en leche puede causar un cambio en la conformación de las proteínas. En estudios realizados en leche entera y descremada se encontró que el tratamiento con US fue capaz de desnaturizar las proteínas del suero ( $\alpha$ -LA y  $\beta$ -LG) y agregados presentes en la leche para formar complejos suero-suero/suero-caseína durante los primeros 30 minutos de sonicación. Tratamientos prolongados resultaron en la ruptura parcial de algunas de las proteínas del suero de estos agregados. (Shanmugam *et al.* 2012). Además de que el efecto de desnaturización se presentó en mayor medida cuando se utilizó calentamiento en comparación con el mismo tratamiento sin calentamiento. Este efecto parece ser de mayor importancia en la leche entera que en la descremada, debido posiblemente a una mayor concentración de sólidos y menor concentración de proteína en la leche entera (Villamiel & de Jong, 2000). Se ha estudiado el efecto del US por medio de sonda (20 kHz) y baño (40 kHz) en concentrados de proteína encontrándose que el tratamiento por medio de sonda tiene un efecto mayor en las propiedades funcionales de las proteínas (Jambrak *et al.*, 2008), por lo que se obtiene un aumento en la solubilidad (lo que conduce a una mayor adsorción de estas en la interfase de los globulos de grasa (GG) y la fase acuosa) (Chandrapala *et al.*, 2014; Yanjun *et al.*, 2014), y la habilidad de formar espumas. Esto se atribuye a los cambios conformacionales en la estructura de las proteínas (desnaturización) debido a modificaciones en la temperatura y la conductividad del medio (Jambrak *et al.*, 2014). La hidrofobicidad de las proteínas también aumenta cuando los tratamientos con US son menores a 5 min, ya que después de pasado este tiempo, se forman agregados proteicos porque las proteínas parcialmente desnaturizadas forman enlaces entre

---

ellas y por lo tanto se reduce su hidrofobicidad y afecta la capacidad de adsorción de proteína en la interfase (Chandrapala *et al.*, 2011). Ching *et al.* (2014) estudiaron el efecto del US en la espuma de proteína de suero. Encontraron que se obtiene mayores valores de aireación y menores valores de drenado, y a medida que se aumentaba la amplitud y el tiempo de sonicación, las proteínas del suero formaban espumas con una mayor estabilidad.

Los procedimientos de emulsificación fueron una de las primeras aplicaciones del US en la industria alimenticia. La implosión de las burbujas en la interfase de dos líquidos inmiscibles provoca una onda que provee en un efectivo método de mezcla de las dos capas, generando emulsiones más estables cuando se comparan con las elaboradas a través de técnicas convencionales y requieren de poco emulsificante (Mason *et al.*, 1996). Entre las ventajas de la emulsificación mediante US, se encuentra la posibilidad de reducir el tamaño del glóbulo de grasa y obtener una distribución de tamaño angosta en un menor tiempo comparado con los procedimientos convencionales (Pingret *et al.*, 2013). El uso del US para batir, mezclar o agitar sistemas sin alterar sus características químicas ha sido estudiado especialmente en el procesamiento de leche y yogur (Mason *et al.*, 1996; Wu *et al.*, 2001).

Se ha mostrado que después de utilizar tratamientos con US el tamaño del GG se reduce y se obtienen distribuciones bimodales (Vijayakumar, 2012). Un ejemplo de esto es que después de 60 min de sonicación el tamaño del GG se redujo aproximadamente 10 nm (Chandrapala *et al.*, 2012) y a medida que se aumentaba el tratamiento con US su tamaño seguía disminuyendo. También se encontró que cuando se realizaba el tratamiento con US sin calentamiento o a temperaturas bajas se encontraban aglomerados de GG con caseínas en el medio (Villamiel & de Jong, 2000)

Para el caso de las micelas de caseína, algunas investigaciones muestran que las fuerzas físicas de la cavitación no afectaron su estructura ya que quedaron intactas (Chandrapala *et al.*, 2012; Shanmugam *et al.*, 2012), mientras que otras han mostrado que causan cambios significativos en las micelas de caseína, entre los cuales se incluyen la reducción del tamaño y del volumen hidrodinámico, una distribución de tamaño más angosta, la alteración de la partición de la caseína entre las fases micelar y sérica y un incremento significativo en la superficie libre específica (Jambrak *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2014; O'Sullivan *et al.*, 2014). Esto se atribuyó a la reducción de la tensión interfacial que facilitó el rompimiento de las partículas durante la emulsificación por efectos de la cavitación. Además se ha mostrado que a medida que la

---

concentración de sólidos se incrementa, el tamaño de partícula medio aumenta, ya que altas concentraciones de proteína permiten una mayor oportunidad para que se formen agregados (Koh *et al.*, 2014).

Se han demostrado los efectos que tienen los tratamientos con US sobre los polisacáridos hidrocoloides, ya que estudios hechos en xilano de maíz soluble en agua tratado con US, generaron cambios en la viscosidad y la formación de nuevas estructuras insaturadas. Estos cambios se atribuyen a la recombinación de radicales formados en el sacárido y los compuestos aromáticos inducidos por la sonicación de polisacáridos (Ebringerová & Hromádková, 1997). También se han observado cambios en la viscosidad del mousse de chocolate preparado con US comparado con los métodos convencionales, ya que el tratamiento con US permitió desarrollar una viscosidad mejorada debida a efectos de la cavitación (Pingret *et al.*, 2011). Para el caso de leche descremada concentrada y concentrados proteicos que fueron tratados con US, se encontró que la viscosidad se reducía después del tratamiento (Chandrapala *et al.*, 2012; Yanjun *et al.*, 2014), además de que cambiaba el comportamiento pseudoplástico a velocidades de corte menores a  $150 \text{ s}^{-1}$  (Zisu *et al.* 2013). Comportamientos similares presentaron Koh *et al.* (2014) al estudiar el efecto del US en el proceso de la ultrafiltración de suero de leche, ya que encontraron que cuando una muestra precalentada se sometía a tratamiento de US, se observaba una disminución de la viscosidad en comparación con los valores originales nativos. Estos efectos de reducción de viscosidad se atribuyen a la disrupción de las interacciones hidrofóbicas por las fuerzas de corte inducidas por el tratamiento de US. Además observaron que a medida que la concentración de sólidos se incrementaba, los agregados proteicos también lo hacían, por lo que la viscosidad de todas las muestras era mayor. Por otra parte, Erkaya *et al.* (2014) encontraron efectos opuestos a los ya mencionados en la viscosidad y el coeficiente de consistencia obtenidos para el Ayran (bebida de yogur turca). Se mostró que la TS incrementaba la viscosidad y el coeficiente de consistencia mientras que reducía la separación del suero. De igual manera Riener *et al.* (2009b) mostraron que los yogurts elaborados con leche tratada con TS incrementaron la firmeza del gel y la viscosidad, así como la capacidad de retención de agua, comparados con yogurts producidos convencionalmente. Los cambios en el comportamiento de flujo después del tratamiento con US son consecuencia de los cambios en la capacidad de retención de agua (CRA), ya que el US influencia la estructura de las proteínas al exhibir las partes hidrofílicas de los aminoácidos con el agua circundante, lo que conduce a un aumento en la CRA (Phillips & Williams, 1995).

---

Algunos estudios han mostrado la aparición de sabor desagradables y degradación de las grasas en los productos alimenticios con alto contenido lipídico que fueron tratados por US (Chouliara *et al.*, 2010; Cravotto *et al.*, 2008; Riener *et al.*, 2009b; Schneider *et al.*, 2006), ya que la leche tratada con US presenta un incremento en el contenido de volátiles totales sobre el tiempo de sonicación, con la presencia de productos secundarios tales como benceno, tolueno, 1,3-butadieno, entre otros (Riener *et al.*, 2009a, 2009b). Estos productos secundarios son atribuibles a las altas temperaturas asociadas al fenómeno de cavitación. Otros compuestos como el pentanal, hexanal y heptanal indican oxidación lipídica de hidroperóxidos de ácidos grasos insaturados inducida por radicales libres. Los metabolitos secundarios de la oxidación lipídica tales como los alcoholes, aldehídos, cetonas, alcanos, ésteres y ácidos de cadena corta son causantes del sabor desagradable en los productos alimenticios, generalmente caracterizado como sabores *verdes*, *metálicos*, *amargos* o *rancios* (Saxby, 1996).

### **3.9. Alternativas de sustitución de aditivos en helado.**

El desarrollo de tecnologías emergentes en el procesamiento de los alimentos lleva a necesidades específicas del consumidor en torno a la seguridad, salud y alimentos mínimamente procesados. Estos procesos innovadores también conducen al desarrollo de técnicas de manufactura de alimentos sostenibles y amigables con el ambiente y que además tienen un bajo requerimiento de energía y uso de agua, sobrellevando las limitaciones dadas por las actuales prácticas de procesamiento alimenticio (Toepfl *et al.*, 2006).

Los aditivos alimenticios son sustancias de origen natural o sintético, que se agregan a los alimentos con el fin de agregar funciones tecnológicas o sensoriales tales como contrarrestar la perecibilidad y la degradación bacteriana, brindar o restablecer el color o impartir sabores a los alimentos (Bearth *et al.*, 2014). Desde un punto de vista tecnológico, los aditivos alimenticios desarrollan un papel importante en la elaboración de alimentos. Sin embargo, el uso de estos es un tema controversial que provoca desconfianza en el consumidor (Varela & Fiszman, 2013). El requerimiento mercadotécnico de formulaciones con “etiqueta limpia” ha ido en incremento, aunque aún no existe una definición legal de lo que una etiqueta limpia debe ser. Algunas fuentes mencionan que debe contener nombres de ingredientes con los que el consumidor se sienta familiarizado, por lo tanto no debe contener nombres químicos complejos (Skarra, 2006). Es por

---

esto que, tomando ventaja del potencial y oportunidades específicos que ofrecen los procesos innovadores, incluyendo el entendimiento y control de las complejas relaciones proceso-estructura-función, nos da la posibilidad de desarrollar una tecnología de alimentos hechos a la medida (Knorr *et al.*, 2011). Un ejemplo de esto es la sustitución de los estabilizantes en el helado. En algunas investigaciones se modifica la formulación para sustituir los estabilizantes comerciales por otros de origen vegetal, en las cuales las mezclas para helado elaboradas presentan resultados similares a las preparadas con estabilizantes comerciales en cuanto a viscosidad se refiere (Farhoosh & Riazi, 2007; Kaya & Tekin, 2001) pero tardaban más tiempo en congelarse cuando se batían. Por otra parte, el helado elaborado presentaba las mismas características de fundido y calidad sensorial que los helados elaborados con estabilizantes comerciales (Caulfield & Martin, 1933). También se han realizado investigaciones para sustituir o reducir los estabilizantes mediante la modificación de la funcionalidad proteica de la mezcla por medio de alguna tecnología emergente, como el caso de Zimmermann-Stein (2011) que estudió los efectos del uso de recirculaciones múltiples de homogeneización con AP en leche para elaborar helado duro con diferentes cantidades de estabilizante. Sus resultados mostraron que con leche homogeneizada con AP se puede obtener un helado con una cantidad significativamente menor de estabilizantes en su formulación pero las características que presentaba estaban por debajo del estándar para un helado convencional.

---

## IV. METODOLOGÍA.

### 4.1. Plan de investigación.

Los tratamientos de TS se asignaron de acuerdo a un diseño central compuesto (DCC) de 15 tratamientos con una réplica, usando la potencia teórica entregada, la energía específica y la concentración del estabilizante (Tabla 4) como variables independientes mientras que las propiedades físicas de la mezcla (color, viscosidad y tamaño de partícula) y del helado (IA, firmeza y velocidad de drenado) fueron las respuestas evaluadas. Se elaboró un tratamiento pasteurizado con el 100% de estabilizante recomendado y se utilizó como control. Todas las mediciones se hicieron por triplicado a excepción de la textura (cuadruplicado) y la IA (duplicado). Los datos se analizaron estadísticamente mediante regresiones lineales y por ANOVA de una vía seguido de una prueba Tukey para comparación múltiple de medias ( $P < 0.05$ ) usando el software Minitab 16.0 (Minitab Inc, State College, Pennsylvania, EUA).

**Tabla 4.** Rangos y niveles experimentales de las variables independientes del DCC.

Variables	Rangos y Niveles				
	-1.68	-1	0	1	1.68
Potencia (W)	132	186	266	346	400
Energía Esp. (J/mL)	20	24	30	36	40
Estabilizante (%)	0	20	50	80	100

### 4.2. Materiales y métodos.

Se elaboró una mezcla para helado de formulación estándar (10% grasa, 11% sólidos lácteos no grasos (SLNG), 11% edulcorantes, 5% sólidos de maíz, 0.15% emulsificante y de 0-0.15% de

---

estabilizante) con crema de leche (30% grasa aproximadamente, 6% SLNG), leche entera en polvo (26% grasa, 65% SLNG), concentrado de proteína de leche al 70% (MPC 70), azúcar, maltodextrina (equivalentes de dextrosa = 10), mono y di-glicéridos, CMC, extracto de vainilla y agua purificada. Los ingredientes secos se mezclaron y posteriormente se dispersaron en los ingredientes líquidos previamente calentados (40 °C) mediante agitación a velocidad baja por 5 min, usando un agitador mecánico (Artisan; KitchenAid, Michigan, EUA). Las muestras de 600 mL se sometieron a tratamientos ultrasónicos selectos con una sonda de 22 mm, empleando un procesador ultrasónico (UP400S; Hielscher, Teltow, Alemania) operando a 24 kHz de frecuencia y con una entrega máxima de potencia de 400 W, seguido de una pasteurización HTST (78°C, 20 s). Las mezclas se almacenaron en recipientes plásticos sanitizados y se dejaron reposar por 24 h a 4°C para su maduración. Se agregó 1% (vol/vol) de extracto de vainilla (Gaya Vai-Mex, Veracruz, México) a las mezclas antes de congelarlas. Las mezclas se congelaron en un intercambiador de calor comercial con aditamento de superficie raspada (5030; Lello Musso Pola, Italia) hasta que alcanzó una temperatura de -3 °C. El intercambiador de calor fue lavado y sanitizado antes de iniciar y entre tratamientos. El helado suave se almacenó en recipientes de unicel de 250 mL para realizar las pruebas de velocidad de drenado y de plástico de 50 mL para llevar a cabo las pruebas de textura. Los recipientes se llevaron a refrigeración inmediatamente a -20 °C por 5 días para su posterior análisis.

#### **4.2.1. Viscosidad.**

El comportamiento reológico de la mezcla para helado madurada se determinó usando un viscosímetro rotacional programable (DVIII; Brookfield, Massachusetts, EUA) acoplado a un baño refrigerante de circulación (Polystat; Cole-Parmer, Illinois, EUA). Las mediciones se llevaron a cabo a 15 °C usando un adaptador de muestra pequeña, una aguja del número 31 (SC4-31; Brookfield, Massachusetts, EUA) y una aguja del número 4 (LV-4; Brookfield, Massachusetts, EUA). Las muestras de 20 mL se insertaron en el adaptador y se equilibraron a 15 °C por 5 minutos antes de realizar las mediciones. Se midió la fuerza y la velocidad de corte en un rango de 10 a 250 rpm con un paso de 10 rpm cada 10 segundos. La viscosidad determinada a una velocidad de corte de 50 s<sup>-1</sup> fue elegida para las comparaciones, ya que representa la velocidad de corte de la boca para alimentos de baja viscosidad (Soukoulis *et al*, 2008).

---

Se utilizó el modelo de la ley de potencia (Ecuación 1) para describir las propiedades reológicas de la mezcla. El índice de comportamiento de flujo ( $n$ ) y el índice de consistencia ( $k$ ) se obtuvieron al ajustar el modelo a los datos de viscosidad aparente contra la velocidad de corte (Farhoosh & Riazi, 2007):

$$\eta_a = k\gamma^{(n-1)} \quad (1)$$

Donde:

$\eta_a$  es la viscosidad aparente ( $Pa \cdot s$ ).

$k$  es el índice de consistencia ( $Pa \cdot s^n$ ).

$\gamma$  es la velocidad de corte ( $s^{-1}$ ).

$n$  es el índice de comportamiento de flujo (adimensional).

#### 4.2.2. Color.

El color de la mezcla para helado se determinó en un colorímetro triestímulo (ColorFlex EZ; Hunterlab, Virginia, EUA). Se tomaron 9 mL de mezcla ( $20 \pm 2^\circ C$ ) y se vertieron en una caja de Petri de vidrio para determinar los parámetros en el espacio de color CIELAB, donde  $L^*$  indica luminosidad (100 a 0),  $a^*$  indica la tonalidad del rojo (+) al verde (-) y  $b^*$  indica la tonalidad de amarillo (+) al azul (-). Para estandarizar el instrumento se utilizó un plato blanco con los siguientes valores:  $L^*=93.51$ ;  $a^*=-1.02$ ;  $b^*=1.36$ . La diferencia neta de color ( $\Delta E$ ) fue evaluada con relación a la mezcla testigo utilizando la Ecuación 2. (Roland *et al.*, 1999).

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (2)$$

---

### 4.2.3. Tamaño de partícula.

El tamaño de partícula se determinó por difracción de rayo láser en la mezcla después del madurado, utilizando un equipo de dispersión dinámica de la luz (Nanotracs Wave; Microtracs, Pennsylvania, EUA) mediante el software Microtracs Flex 11. Las muestras se diluyeron (1:4) con agua destilada. Se precalentaron las muestras ( $40 \pm 2^\circ\text{C}$ ) y se agregaron 1.5 mL de dilución en el equipo. Se realizaron las lecturas mediante distribuciones de intensidad, y los índices de refracción utilizados fueron 1.33 para el agua y 1.46 para el caso del glóbulo de grasa (Hayes & Kelly, 2003). Las muestras se mantuvieron a temperatura controlada ( $40 \pm 1^\circ\text{C}$ ) mediante una celda peltier durante la realización del análisis. Se utilizaron las distribuciones de intensidad para calcular el diámetro promedio en superficie (promedio Sauter)  $D[3,2]$  y los diámetros promedio debajo del cual se encuentran el 10, 50 y 90% del total de partículas ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{90}$ ). Para calcular  $D[3,2]$  se utilizó la ecuación 3 (HORIBA, 2012).

$$D[3,2] = \frac{\sum_1^n D_1^3 v_i}{\sum_1^n D_1^2 v_i} \quad (3)$$

Donde:

$D_i$  es el diámetro promedio de la partícula.

$v_i$  es el porcentaje de partículas con ese diámetro.

### 4.2.4. Incorporación de aire.

La IA se determinó por diferencia de volumen antes y después del batido mediante una copa dosificadora de metal previamente enfriada. Para el cálculo de la IA se utilizó la Ecuación 4 (Goff & Hartel, 2013).

---

$$IA = \frac{\text{Volumen del helado} - \text{volumen de la mezcla}}{\text{volumen de la mezcla}} * 100 \quad (4)$$

#### 4.2.5. Velocidad de drenado.

La velocidad de drenado se determinó a temperatura ambiente ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ) en una cámara de ambiente controlado (5518; ETS, EUA) tomando muestras de helado con un peso constante ( $98 \pm 2$  g). La muestra de helado a  $-20^\circ\text{C}$  fue puesta en un tamiz (#8 con apertura de 2.36 mm) suspendido sobre un vaso de precipitado sobrepuesto en una balanza. Se tomó lectura del tiempo requerido para que la primera gota drenara y cada 5 min se anotó el volumen drenado. Con los datos obtenidos se graficó el porcentaje de drenado con respecto al tiempo para posteriormente realizar regresiones lineales y comparar las pendientes y el inicio de drenado de cada uno de los helados (Muse & Hartel, 2004; Roland *et al.*, 1999).

#### 4.2.6. Textura.

La textura se midió como fuerza de penetración a  $-10^\circ\text{C}$  con un texturómetro TAXT Plus equipado con una sonda cilíndrica de acrílico (TA-10; Texture Technologies, Nueva York, EUA) de 10 mm de diámetro utilizando el software Texture Exponent 32. La distancia de penetración en el centro geométrico de la muestra fue de 25 mm y la velocidad de penetración se fijó en 2 mm/s. La firmeza instrumental (kg) de las muestras se determinó como el pico máximo de la fuerza de compresión durante la penetración (Roland *et al.*, 1999; Soukoulis *et al.*, 2008).

#### 4.2.7. Optimización de tratamientos.

Se llevó a cabo la búsqueda de dos tratamientos óptimos mediante la función Solver incluida en el software Excel 2013 (Microsoft, Redmond EUA). Los cálculos de optimización se llevaron a

---

cabo para obtener las respuestas óptimas de los tres parámetros que se consideraron más importantes (textura, IA y velocidad de drenado) con los parámetros  $\beta$  obtenidos de las ecuaciones de regresión, para así localizar los valores de los factores  $x_1$  (potencia),  $x_2$  (energía específica) y  $x_3$  (cantidad de estabilizante). El modelo se ajustó con las condiciones de que se obtuviera la máxima IA, restringiendo la firmeza entre los valores de 7 y 8 kg y manteniendo la velocidad de drenado en un valor menor que 0.95 (%/min). Además se buscó que uno de los tratamientos optimizados no tuviera estabilizante en su formulación y el otro tuviera 50% aproximadamente.

#### 4.2.8. Cálculos de calorimetría.

Una vez obtenidos los tratamientos óptimos, se procedió a calcular los valores de potencia real entregada al medio de estos dos tratamientos mediante los registros de la temperatura como función del tiempo en los tratamientos de US a los que se sometió la mezcla para helado, se calculó una estimación del poder acústico (W) por medio de la Ecuación 5 (Margulis & Margulis, 2005; Margulis & Margulis, 2003). La razón del porque solamente se calculó la potencia real en los tratamientos óptimos y no en todo el diseño experimental fue porque no era factible económicamente ya que de hacerlo se hubiera requerido de una gran cantidad de insumos (MPC 70) de los cuales su precio no era accesible. Además de que el uso del equipo no era exclusivo para este proyecto, por lo que el tiempo de uso también fue un factor importante en la decisión.

$$P = m \cdot C_p \cdot \left( \frac{dT}{dt} \right)_{t=0} \quad (5)$$

Dónde:

$m$  es la masa del líquido sonicado (g).

$C_p$  es calor específico a una presión constante (J/gK).

$(dT/dt)_{t=0}$  es la pendiente en el origen de la curva.

---

El Cp de los diferentes tratamientos se calculó mediante la ecuación de Choi y Okos (6) (Singh & Heldman, 2009).

$$Cp = 1.424X_h + 1.549X_p + 1.675X_f + 0.837X_a + 4.187X_w \quad (6)$$

Dónde:

$X_h$  es la fracción másica de los carbohidratos.

$X_p$  es la fracción másica de las proteínas.

$X_f$  es la fracción másica de la grasa.

$X_a$  es la fracción másica de las cenizas.

$X_w$  es la fracción másica de la humedad.

#### 4.2.9. Evaluación sensorial.

Se realizó un análisis sensorial mediante una prueba afectiva (categorías de preferencia) con los dos tratamientos óptimos y un control (pasteurizado). Se seleccionaron 48 panelistas no entrenados (19 hombres y 29 mujeres de entre 19 y 27 años). Se utilizó una escala hedónica (1=menos intenso, 3=más intenso) para evaluar los atributos olor, gomosidad, arenosidad, sabor metálico, sabor a vainilla y agrado general. Los datos recolectados acerca de los atributos fueron analizados mediante un análisis de Friedman y un análisis de ordenamiento por rangos. Para realizar el análisis de resultados se dio un valor de 1 a la menor intensidad, 2 a la intensidad media y 3 a la mayor intensidad (Pedrero & Pangborn, 1989). El nivel de agrado fue analizado a través del método Índice R (R-Index) el cuál proporciona un porcentaje acerca del cual una muestra es preferida sobre otra, utilizando la Ecuación 6.

$$IR = \frac{a(f + g) + b(g) + \frac{1}{2}(ae + bf + cg)}{(a + b + c)(e + f + g)} \quad (7)$$

---

En la Tabla 5 se puede observar el arreglo de los parámetros para la comparación entre el tratamiento 1 (T1) y tratamiento 2 (T2).

**Tabla 5.** Formato para la comparación de tratamientos para el índice R.

<b>Tratamiento</b>	<b>Mayor agrado</b>		<b>Menor agrado</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>T1</b>	a	b	c
<b>T2</b>	e	f	g

El valor mínimo de *IR* es 50 y el máximo es 100. Si el valor es cercano a 50 no hay preferencia o gusto hacia ninguno, y cercano a 100 se prefiere absolutamente sobre el otro (Lee *et al.*, 2007; Lee & van Hout, 2009).

---

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Influencia de la termosonicación en las propiedades reológicas.

Debido a la complejidad de la mezcla, el comportamiento reológico es afectado por muchos factores incluyendo la presencia de los componentes y su concentración (grasa, polisacáridos y proteínas), el fenómeno de hidratación ocurrido durante la maduración, la agregación de las proteínas, la cristalización de la grasa y la coalescencia o floculación de los glóbulos de grasa (Goff *et al.*, 1994). Los parámetros obtenidos al ajustar el modelo de la ley de potencia para la viscosidad aparente contra la velocidad de corte y los coeficientes de determinación se muestran en la Tabla 6. De acuerdo a estos datos, el modelo utilizado describe el comportamiento de flujo de las mezclas, ya que todos los coeficientes de determinación fueron altos ( $R^2 > 0.97$ ). Se encontraron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en la viscosidad, el coeficiente de consistencia y el índice de comportamiento de fluido entre las mezclas para helado. Los cambios más notorios se obtuvieron en las mezclas tratadas con potencias menores o iguales a 266 W y niveles de estabilizante utilizado en la formulación de 50%. Mediante el análisis de regresión (Apéndice C.1.1) se puede observar que el único factor lineal significativo ( $P < 0.05$ ) fue el factor potencia y este tiene un efecto negativo, lo que indica que a medida que se incrementa la potencia la viscosidad disminuye; además el factor cuadrático para el estabilizante también fue significativo. En el caso de los factores energía específica y proporción de estabilizante, estos no fueron significativos pero mostraron un comportamiento positivo. El coeficiente de correlación obtenido de la regresión para la viscosidad fue de 0.65. Con base en los datos experimentales se estableció una relación lineal positiva entre la viscosidad y el tamaño de partícula, ya que al disminuir el tamaño de partícula por el efecto del tratamiento con US, la viscosidad observada también fue menor (Figura 6). Este comportamiento coincide con el trabajo realizado por Chandrapala *et al.*, (2012) para leche fresca descremada ya que ellos encontraron que al aplicar el tratamiento con US, se observaba una disminución en el tamaño de partícula y de la viscosidad debido a los efectos de la cavitación.

**Tabla 6.** Efecto de la termosonicación en los parámetros reológicos de la mezcla para helado.<sup>1</sup>

Tratamiento <sup>2</sup>	$\eta_{50}^3$	k	n	R <sup>2</sup>
<b>Control</b>	137.24 ± 3.95 <sup>f</sup>	424.44 ± 15.43 <sup>ef</sup>	0.71 ± 0.002 <sup>cd</sup>	0.9981
<b>186/24/20</b>	75.51 ± 1.60 <sup>g</sup>	165.17 ± 19.85 <sup>ef</sup>	0.80 ± 0.025 <sup>ab</sup>	0.9854
<b>186/24/80</b>	164.37 ± 2.14 <sup>f</sup>	607.79 ± 16.09 <sup>de</sup>	0.67 ± 0.003 <sup>de</sup>	0.9959
<b>186/36/20</b>	147.95 ± 7.69 <sup>f</sup>	516.17 ± 41.18 <sup>def</sup>	0.68 ± 0.007 <sup>de</sup>	0.9979
<b>186/36/80</b>	418.34 ± 1.87 <sup>c</sup>	1624.56 ± 21.68 <sup>c</sup>	0.65 ± 0.005 <sup>de</sup>	0.9939
<b>345/24/20</b>	65.17 ± 2.34 <sup>g</sup>	122.68 ± 14.48 <sup>f</sup>	0.84 ± 0.021 <sup>a</sup>	0.9703
<b>345/24/80</b>	86.98 ± 2.01 <sup>g</sup>	233.50 ± 3.31 <sup>ef</sup>	0.75 ± 0.002 <sup>bc</sup>	0.9975
<b>345/36/20</b>	73.62 ± 0.70 <sup>g</sup>	154.41 ± 16.89 <sup>f</sup>	0.81 ± 0.026 <sup>a</sup>	0.9826
<b>345/36/80</b>	150.67 ± 1.77 <sup>f</sup>	560.21 ± 35.88 <sup>def</sup>	0.66 ± 0.013 <sup>de</sup>	0.9962
<b>132/30/50</b>	938.31 ± 23.12 <sup>a</sup>	5771.64 ± 260.81 <sup>a</sup>	0.54 ± 0.005 <sup>f</sup>	0.9978
<b>400/30/50</b>	378.38 ± 14.32 <sup>d</sup>	1575.73 ± 181.11 <sup>c</sup>	0.64 ± 0.020 <sup>e</sup>	0.9975
<b>266/20/50</b>	754.23 ± 12.25 <sup>b</sup>	4729.45 ± 253.87 <sup>b</sup>	0.53 ± 0.010 <sup>f</sup>	0.9986
<b>266/40/50</b>	734.83 ± 7.27 <sup>b</sup>	4711.84 ± 108.73 <sup>b</sup>	0.53 ± 0.003 <sup>f</sup>	0.9955
<b>266/30/0</b>	90.71 ± 3.41 <sup>g</sup>	199.64 ± 37.48 <sup>ef</sup>	0.80 ± 0.039 <sup>ab</sup>	0.9838
<b>266/30/100</b>	270.78 ± 4.06 <sup>e</sup>	918.56 ± 17.21 <sup>d</sup>	0.69 ± 0.001 <sup>cde</sup>	0.9971
<b>266/30/50</b>	741.85 ± 16.89 <sup>b</sup>	5104.75 ± 140.77 <sup>b</sup>	0.51 ± 0.001 <sup>f</sup>	0.9966

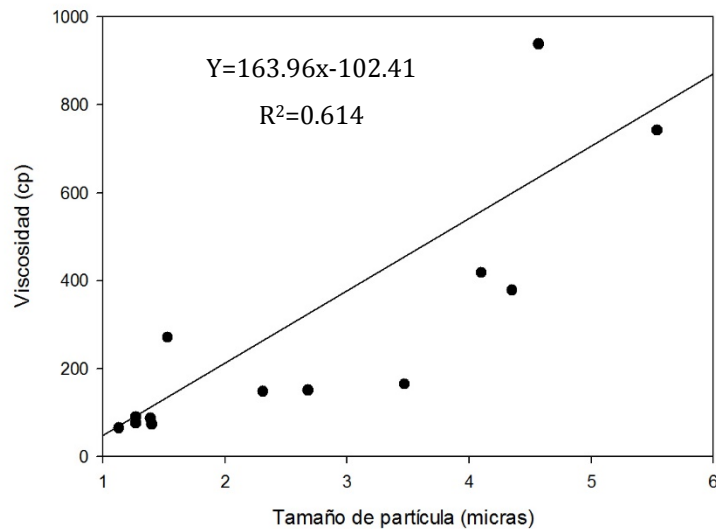
Medias que no comparten una misma letra son significativamente diferentes (P<0.05).

<sup>1</sup> Promedio de duplicados.

<sup>2</sup> Los valores en el nombre del tratamiento se refieren a potencia, energía específica y cantidad de estabilizante respectivamente.

<sup>3</sup>  $\eta_{50}$  se refiere a la viscosidad determinada a una velocidad de corte de 50<sup>s</sup>.

Teóricamente se esperaría que tratamientos más intensos de US las partículas fueran más pequeñas y la viscosidad disminuyera, pero como empíricamente se obtiene una viscosidad más alta, se puede atribuir a la coalescencia parcial de las partículas de grasa (Boode *et al.*, 1993), a la formación de aglomerados entre los glóbulos de grasa y las proteínas encontradas en la mezcla (Barford *et al.*, 1991; Caldwell *et al.*, 1992) y al aumento en la capacidad de retención de agua de las proteínas cuando estas se desnaturalizan (E. *et al.*, 2010; Goff, 2011a).



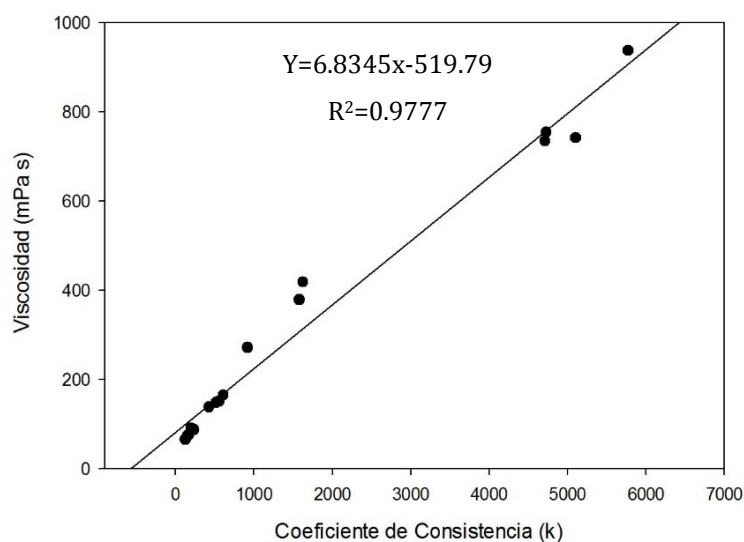
**Figura 6.** Dispersión y regresión de datos de viscosidad vs tamaño de partícula de mezcla de helado sometidas a tratamientos selectos de termosonicación

Los coeficientes de consistencia indican la capacidad espesante relativa de una solución. En las mezclas para helado los coeficientes de consistencia fueron correlacionados positivamente con los valores de viscosidad aparente ( $R^2 = 0.97$ ) (Figura 7) de forma similar a lo reportado por Aime *et al.* (2001) y Akalın *et al.* (2008) para helado bajo en grasa. En el Apéndice C.1.2 se muestra el análisis de regresión ( $R=0.66$ ) de los coeficientes de consistencia. Se puede observar que el único factor lineal significativo es la potencia mostrando un efecto negativo y los factores energía específica y estabilizante mostraron un efecto positivo, aunque estos no fueron significativos. También se muestra que los factores cuadráticos para potencia y estabilizante fueron significativos.

El índice de comportamiento de flujo indica que tan cercano es el comportamiento de la mezcla con un fluido Newtoniano. Se ha reportado que su valor para las mezclas de helado es de alrededor de 0.7 (Goff *et al.*, 1994). Todos los índices de comportamiento de flujo de esta investigación fueron menores a 1, lo que indica un comportamiento pseudoplástico, lo cual concuerda con lo reportado para helado por Goff & Davidson (1992). Los tratamientos que mostraron un comportamiento más cercano a un fluido Newtoniano fueron los que en su formulación contenían la menor cantidad de estabilizante (<20%), esto se atribuye a la baja viscosidad presentada en estos tratamientos ya que como se ha mostrado en investigaciones

---

previas (Cevoli *et al.*, 2013; Marcotte *et al.*, 2001; Rezaei *et al.*, 2011), conforme se incrementa la concentración de estabilizantes también lo hace la viscosidad, por lo que el valor del índice de comportamiento de flujo disminuye, mostrando así un comportamiento pseudoplástico progresivo, pero al disminuir la concentración de estabilizantes se presenta un efecto contrario. De acuerdo al análisis de regresión ( $R=0.75$ ), a medida que la potencia se aumenta el valor de  $n$  aumenta y a medida que los valores de energía específica y estabilizante aumentan el valor de  $n$  disminuye. Además se muestra que los factores lineales potencia y estabilizante fueron significativos, así como sus respectivos factores cuadráticos. (Apéndice C.1.3).



**Figura 7.** Dispersión y regresión de datos de viscosidad vs coeficiente de consistencia de mezcla de helado sometidas a tratamientos selectos de termosonicación

## 5.2. Influencia de la termosonicación en el color de mezcla.

El color observado instrumentalmente en las mezclas para helado sometidas a tratamientos de US se muestra en la Tabla 7. Al analizar la regresión realizada para el parámetro  $L^*$  ( $R^2=0.53$ ) se observa que los tres factores lineales fueron significativos ( $P<0.05$ ), pero las interacciones y factores cuadráticos no lo fueron. Además, a medida que se aumenta la energía específica la luminosidad también aumenta, caso contrario a lo que sucede cuando se aumentan los factores potencia y estabilizante (Apéndice C.2.1). Para el caso de la regresión del parámetro  $a^*$  no se

observa una correlación clara demostrado por el bajo valor del coeficiente de regresión ( $R^2=0.25$ ). Es importante destacar que ningún factor de la regresión fue significativo y los tres factores lineales presentaron un efecto negativo (Apéndice C.2.2). En cuanto a la regresión del parámetro  $b^*$  ( $R^2=0.59$ ), se observó que el factor lineal potencia fue significativo además de la interacción potencia-energía específica y los tres factores cuadráticos. El factor potencia mostró un efecto negativo mientras que los factores energía específica y estabilizante mostraron un efecto positivo (Apéndice C.2.3). La regresión del cambio neto de color ( $R^2=0.54$ ) mostró que los factores lineales fueron significativos mientras que las interacciones y los factores cuadráticos no lo fueron. Además de que los factores potencia y estabilizante mostraron un efecto negativo y el factor energía específica mostró un efecto positivo (Apéndice C.2.4)

**Tabla 7.** Parámetros de color de las mezclas termosonicadas para helado duro.<sup>1</sup>

<b>Tratamiento<sup>2</sup></b>	<b>L*</b>	<b>a*</b>	<b>b*</b>	<b><math>\Delta E^3</math></b>
<b>Control</b>	78.64 ± 0.42 <sup>c</sup>	-4.57 ± 0.15 <sup>a</sup>	4.78 ± 0.08 <sup>c</sup>	
<b>186/24/20</b>	82.79 ± 0.23 <sup>ab</sup>	-3.85 ± 0.06 <sup>a</sup>	6.66 ± 0.23 <sup>ab</sup>	4.60 ± 0.30 <sup>ab</sup>
<b>186/24/80</b>	82.20 ± 0.01 <sup>ab</sup>	-4.11 ± 0.45 <sup>a</sup>	7.03 ± 0.28 <sup>ab</sup>	4.25 ± 0.19 <sup>ab</sup>
<b>186/36/20</b>	84.67 ± 1.01 <sup>a</sup>	-3.93 ± 0.21 <sup>a</sup>	6.39 ± 0.43 <sup>abc</sup>	6.29 ± 0.83 <sup>a</sup>
<b>186/36/80</b>	81.71 ± 0.12 <sup>abc</sup>	-3.74 ± 0.05 <sup>a</sup>	6.24 ± 0.06 <sup>abc</sup>	3.50 ± 0.07 <sup>ab</sup>
<b>345/24/20</b>	82.08 ± 0.90 <sup>ab</sup>	-3.85 ± 0.03 <sup>a</sup>	5.46 ± 0.70 <sup>bc</sup>	3.59 ± 0.99 <sup>ab</sup>
<b>345/24/80</b>	80.23 ± 1.01 <sup>bc</sup>	-3.98 ± 0.18 <sup>a</sup>	5.98 ± 0.70 <sup>abc</sup>	2.24 ± 0.39 <sup>b</sup>
<b>345/36/20</b>	81.99 ± 1.01 <sup>abc</sup>	-4.18 ± 0.53 <sup>a</sup>	6.70 ± 0.38 <sup>ab</sup>	3.89 ± 1.11 <sup>ab</sup>
<b>345/36/80</b>	81.74 ± 0.16 <sup>abc</sup>	-4.11 ± 0.32 <sup>a</sup>	6.10 ± 0.56 <sup>abc</sup>	3.43 ± 0.02 <sup>ab</sup>
<b>132/30/50</b>	82.56 ± 0.33 <sup>ab</sup>	-4.28 ± 0.46 <sup>a</sup>	6.46 ± 0.50 <sup>ab</sup>	4.29 ± 0.46 <sup>ab</sup>
<b>400/30/50</b>	81.91 ± 0.97 <sup>abc</sup>	-4.17 ± 0.49 <sup>a</sup>	6.22 ± 0.41 <sup>abc</sup>	3.61 ± 1.10 <sup>ab</sup>
<b>266/20/50</b>	80.32 ± 1.48 <sup>bc</sup>	-3.91 ± 0.14 <sup>a</sup>	6.19 ± 0.47 <sup>abc</sup>	2.49 ± 0.69 <sup>b</sup>
<b>266/40/50</b>	82.73 ± 1.04 <sup>ab</sup>	-4.49 ± 0.11 <sup>a</sup>	6.55 ± 0.39 <sup>ab</sup>	4.46 ± 1.10 <sup>ab</sup>
<b>266/30/0</b>	82.65 ± 0.46 <sup>ab</sup>	-4.52 ± 0.11 <sup>a</sup>	6.20 ± 0.23 <sup>abc</sup>	4.26 ± 0.51 <sup>ab</sup>
<b>266/30/100</b>	82.07 ± 1.70 <sup>ab</sup>	-4.59 ± 0.06 <sup>a</sup>	7.18 ± 0.13 <sup>a</sup>	4.24 ± 1.45 <sup>ab</sup>
<b>266/30/50</b>	81.55 ± 0.38 <sup>abc</sup>	-4.19 ± 0.45 <sup>a</sup>	5.40 ± 0.33 <sup>bc</sup>	3.03 ± 0.35 <sup>b</sup>

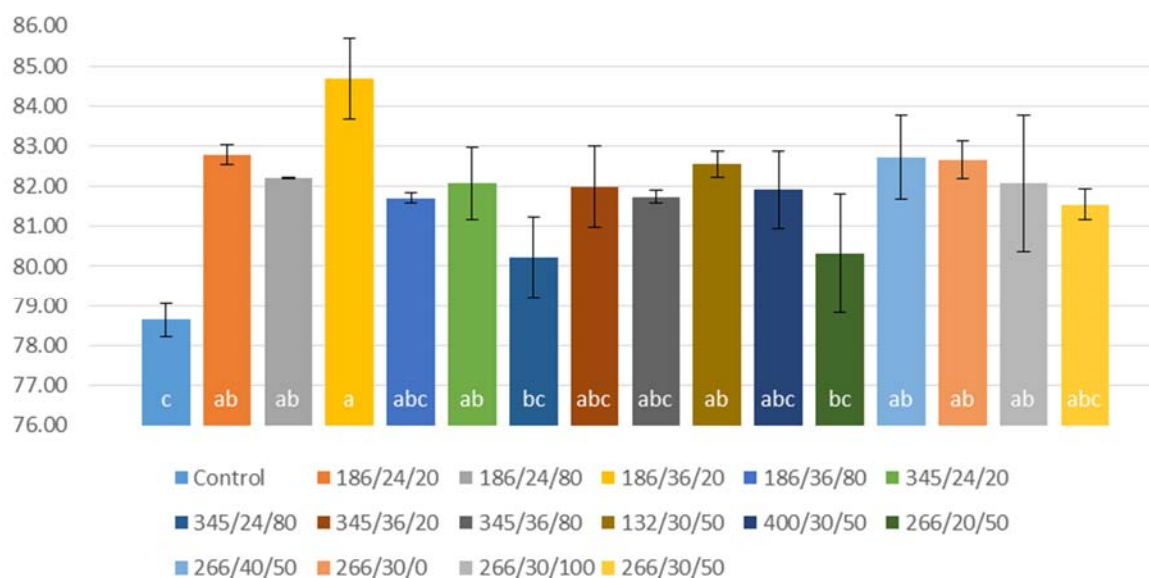
Medias que no comparten una misma letra son significativamente diferentes ( $P<0.05$ ).

<sup>1</sup>Promedio de duplicados.

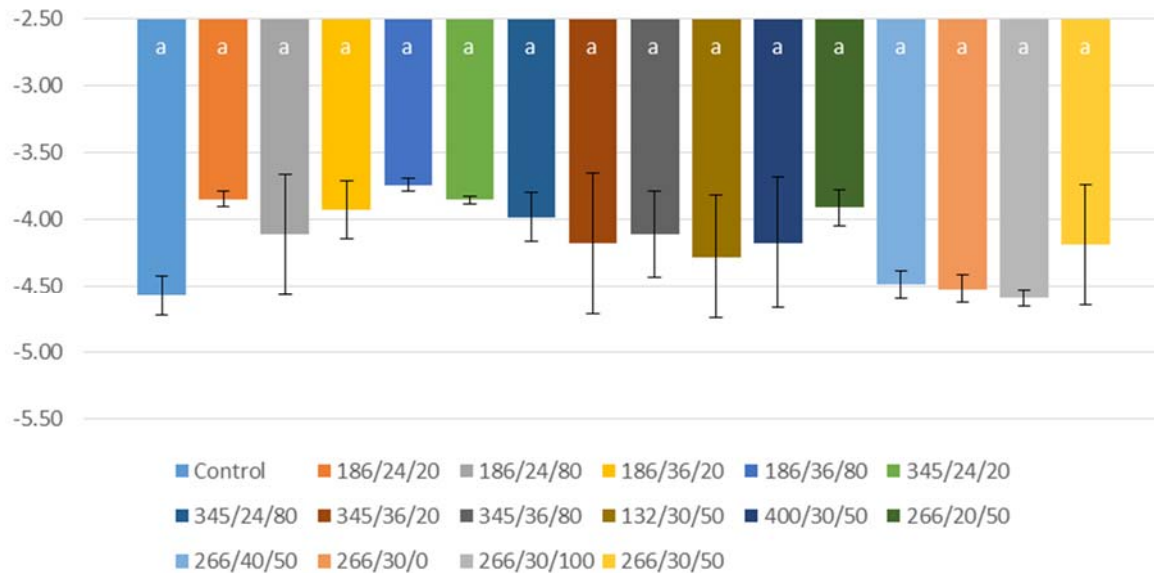
<sup>2</sup>Los valores en el nombre del tratamiento se refieren a potencia, energía específica y cantidad de estabilizante respectivamente.

<sup>3</sup>Tomando el control como referencia.

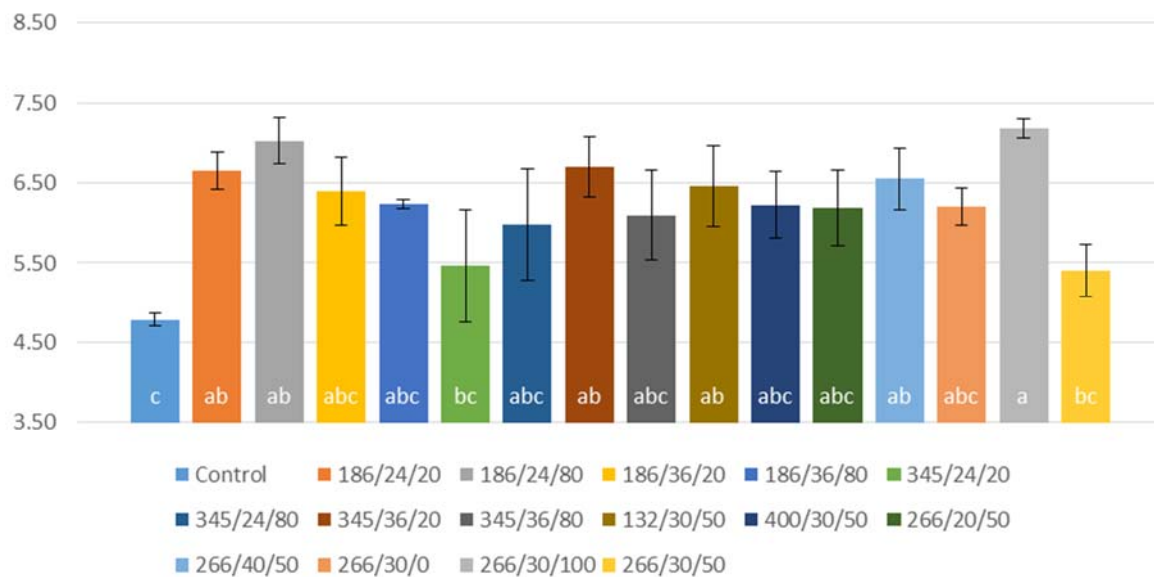
Se observaron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en el parámetro  $L^*$  entre los tratamientos y el control pero no entre ellos, a excepción de los tratamientos 6 y 11 (345/24/80 y 266/20/50 respectivamente) (Figura 8). En general todos los tratamientos ultrasónicos presentaron una mayor luminosidad ( $>80$ ) que la que presentó el control (78.64). El cambio de color hacia un tono más blanco, indica una mayor luminosidad debida a la disminución en el tamaño de partícula del glóbulo de grasa, posibilitándose así una mayor difracción de la luz (Pereda *et al.*, 2007). Esto puede atribuirse a los efectos de la cavitación por el US (Bermúdez-Aguirre *et al.*, 2009). En los productos lácteos, el contenido de grasa, el tipo de estabilizante y la concentración son los factores composicionales más importantes que afectan el color. El contenido de grasa hace que la leche y sus derivados se vean más blancos (Arancibia *et al.*, 2014). Además, la leche experimenta un cambio de color durante los procesos térmicos, uno de ellos es el incremento en la luminosidad debido a la desnaturalización de la  $\beta$ -LG y su conjugación con la  $\kappa$ -CN (Devi *et al.*, 2015). Hayes *et al.* (2005) y Hayes & Kelly (2003) estudiaron el efecto de la homogeneización convencional y de AP sobre la leche cruda. Ellos encontraron que se incrementaba la luminosidad y ocurrían pequeños cambios en los parámetros  $a^*$  y  $b^*$ . Los cambios en la luminosidad se pueden atribuir al estado de las micelas de caseína. En general, valores bajos del parámetro  $L^*$  indican una desintegración de las micelas de caseína.



**Figura 8.** Valores de luminosidad en las mezclas termosonicadas para helado duro.



**Figura 9.** Valores del parámetro  $a^*$  en las mezclas termosonicadas para helado duro.

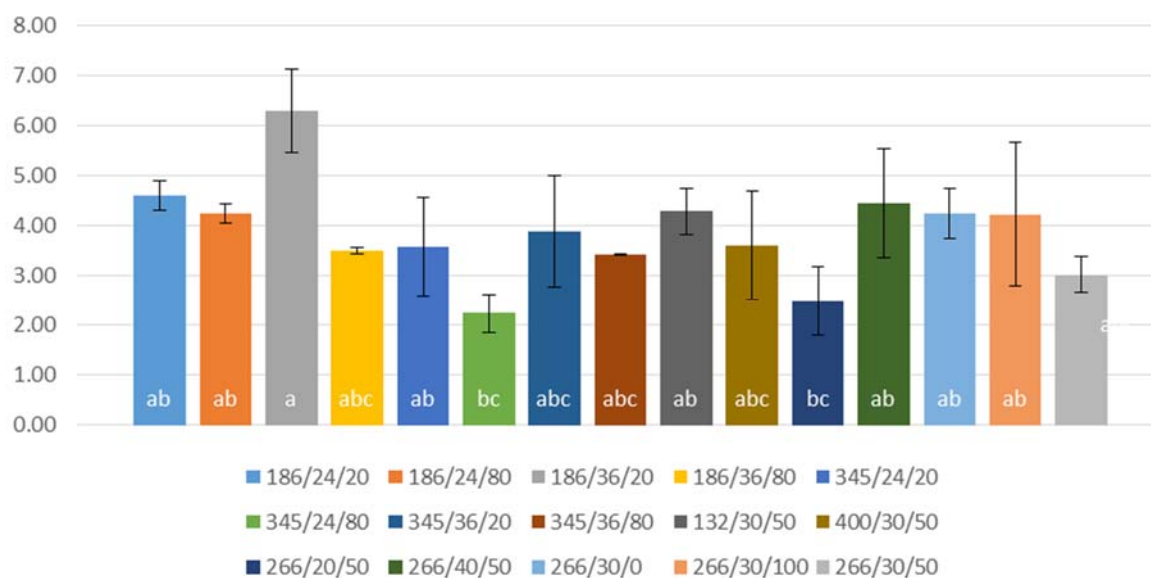


**Figura 10.** Valores del parámetro  $b^*$  en las mezclas termosonicadas para helado duro.

Por otra parte, no hubo diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en el parámetro  $a^*$  (Figura 9). Todos los tratamientos tuvieron tendencia negativa, lo que indica una mayor contribución en la

región de color verde en las mezclas tratadas con US. En cuanto al parámetro  $b^*$ , se observaron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre los tratamientos y el control pero no entre tratamientos, a excepción de los tratamientos 5 y 15 (345/24/20 y 266/30/50 respectivamente) (Figura 10). Todos los tratamientos presentaron una tendencia hacia valores más positivos, esto sugiere que las mezclas presentaban ligeros tonos amarillos después de ser tratadas con el US. El comportamiento de los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  se puede atribuir a la disminución en el tamaño de partícula del GG, permitiendo que en los tratamientos se presenten colores amarillos y verdes debidos a componentes minoritarios como la riboflavina (Lee *et al.*, 1998).

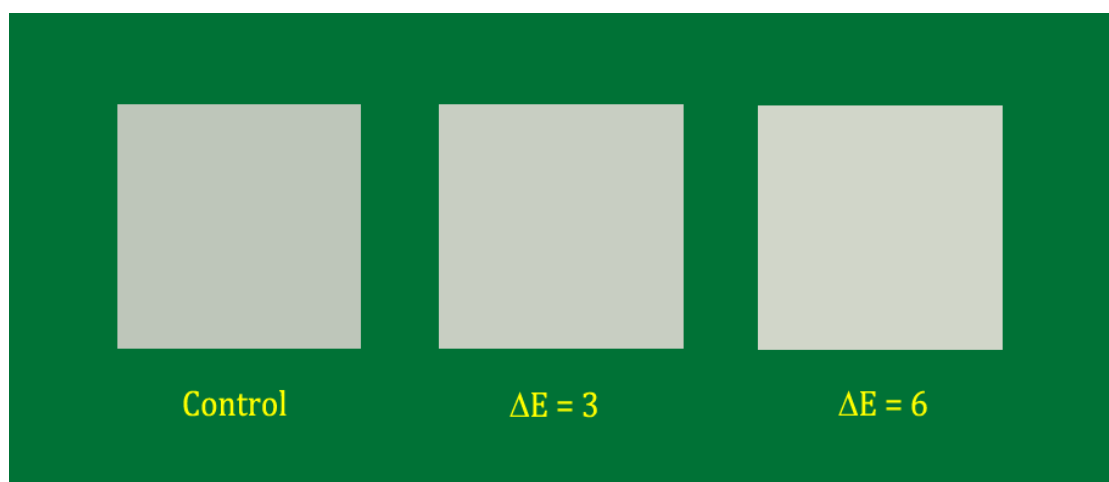
No se observaron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en el cambio neto de color, con excepción de los tratamientos 6 y 11 (345/24/80 y 266/20/50 respectivamente) (Figura 11). Se esperaría que estas diferencias fueran mayores, considerando la magnitud de los cambios en los parámetros  $L^*$  y  $b^*$ , pero al parecer la similitud de los valores del parámetro  $a^*$  compensa y reduce el cambio neto de color. El cambio neto de color se encuentra en un rango de 3 a 5 en la mayoría de los tratamientos, excepto en los tratamientos 3, 6 y 11 que mostraron un cambio de color neto de 6.29, 2.24 y 2.49 respectivamente. Los valores de los parámetros  $b^*$  y  $\Delta E$  son similares a los reportados por Bermúdez-Aguirre *et al.* (2009) para el caso de leche entera sometida a tratamientos de US, ya que ellos reportan valores para  $b^*$  en un rango de 5 a 6 y valores para el cambio de color neto en un rango de 4 a 6.



**Figura 11.** Valores de cambio de color neto ( $\Delta E$ ) en las mezclas termosonicadas para helado duro.

---

A pesar de que los tratamientos presentaron instrumentalmente cambios en los parámetros de color, dichos cambios no fueron perceptibles a simple vista. Esto puede observarse claramente en la Figura 12, donde se muestran los colores obtenidos al ingresar los valores de los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  en el software Color converter (Color Converter, 2013).



**Figura 12.** Diferencias presentadas en el cambio de color neto de las mezclas para helado tratadas con US.

### 5.3. Influencia de la termosonicación en el tamaño de partícula.

En la Tabla 8 se muestran los valores de distribución del tamaño de partícula después de la TS. En general se observó una reducción en el tamaño medio de partícula ( $D_{50}$ ) de hasta un 58% con respecto al control en la mayoría de los tratamientos sometidos a US con excepción de los casos 2, 4, 9, 10, 11, 12 y 15 (186/24/80, 186/36/80, 132/30/50, 400/30/50, 266/20/50, 266/40/50, 266/30/50 respectivamente) en los que se presentó un incremento de hasta un 105%. Este comportamiento se puede atribuir a la formación de aglomerados por coalescencia parcial de los GG (Boode *et al.*, 1993).

**Tabla 8.** Distribución de tamaño de partícula de las mezclas termosónicas para helado duro.<sup>1</sup>

Tratamiento <sup>2</sup>	D <sub>32</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>
<b>Control</b>	4.53 ± 0.14 <sup>bcd</sup>	0.30 ± 0.02 <sup>c</sup>	2.70 ± 0.45 <sup>def</sup>	4.69 ± 0.05 <sup>abcd</sup>
<b>186/24/20</b>	4.88 ± 0.15 <sup>bcd</sup>	0.37 ± 0.03 <sup>c</sup>	1.27 ± 0.11 <sup>fg</sup>	4.95 ± 0.16 <sup>abcd</sup>
<b>186/24/80</b>	4.73 ± 0.24 <sup>bcd</sup>	0.41 ± 0.03 <sup>c</sup>	3.47 ± 0.08 <sup>bcd</sup>	4.86 ± 0.28 <sup>abcd</sup>
<b>186/36/20</b>	4.28 ± 0.40 <sup>bcd</sup>	0.41 ± 0.01 <sup>c</sup>	2.31 ± 0.38 <sup>efg</sup>	4.30 ± 0.42 <sup>bcd</sup>
<b>186/36/80</b>	5.37 ± 0.34 <sup>ab</sup>	0.47 ± 0.01 <sup>c</sup>	4.10 ± 0.24 <sup>bcd</sup>	5.59 ± 0.33 <sup>abc</sup>
<b>345/24/20</b>	4.16 ± 0.02 <sup>cd</sup>	0.32 ± 0.02 <sup>c</sup>	1.13 ± 0.06 <sup>g</sup>	4.13 ± 0.04 <sup>cd</sup>
<b>345/24/80</b>	3.97 ± 0.55 <sup>d</sup>	0.34 ± 0.06 <sup>c</sup>	1.39 ± 0.53 <sup>fg</sup>	3.43 ± 1.27 <sup>d</sup>
<b>345/36/20</b>	4.69 ± 0.05 <sup>bcd</sup>	0.31 ± 0.01 <sup>c</sup>	1.40 ± 0.20 <sup>fg</sup>	4.81 ± 0.12 <sup>abcd</sup>
<b>345/36/80</b>	4.11 ± 0.27 <sup>cd</sup>	0.39 ± 0.00 <sup>c</sup>	2.68 ± 0.56 <sup>def</sup>	4.19 ± 0.37 <sup>bcd</sup>
<b>132/30/50</b>	5.44 ± 0.47 <sup>ab</sup>	3.02 ± 0.41 <sup>b</sup>	4.57 ± 0.63 <sup>ab</sup>	5.87 ± 0.33 <sup>ab</sup>
<b>400/30/50</b>	5.29 ± 0.06 <sup>abc</sup>	0.53 ± 0.02 <sup>c</sup>	4.35 ± 0.15 <sup>abc</sup>	5.57 ± 0.03 <sup>abc</sup>
<b>266/20/50</b>	4.59 ± 0.58 <sup>bcd</sup>	2.12 ± 0.21 <sup>b</sup>	3.12 ± 0.21 <sup>cde</sup>	5.15 ± 0.78 <sup>abc</sup>
<b>266/40/50</b>	4.90 ± 0.10 <sup>bcd</sup>	2.19 ± 0.67 <sup>b</sup>	3.43 ± 0.68 <sup>bcd</sup>	5.54 ± 0.02 <sup>abc</sup>
<b>266/30/0</b>	4.78 ± 0.01 <sup>bcd</sup>	0.35 ± 0.03 <sup>c</sup>	1.27 ± 0.03 <sup>fg</sup>	4.84 ± 0.01 <sup>abcd</sup>
<b>266/30/100</b>	5.22 ± 0.30 <sup>abc</sup>	0.35 ± 0.01 <sup>c</sup>	1.53 ± 0.24 <sup>fg</sup>	5.40 ± 0.16 <sup>abc</sup>
<b>266/30/50</b>	6.09 ± 0.00 <sup>a</sup>	4.17 ± 0.49 <sup>a</sup>	5.54 ± 0.13 <sup>a</sup>	6.25 ± 0.04 <sup>a</sup>

Medias que no comparten una misma letra son significativamente diferentes (P<0.05).

<sup>1</sup> Promedio de duplicados.

<sup>2</sup> Los valores en el nombre del tratamiento se refieren a potencia, energía específica y cantidad de estabilizante respectivamente.

La mayoría de los resultados obtenidos para D<sub>32</sub> no presentaron diferencia significativa (P<0.05) con respecto al control, con excepción del tratamiento 15 (266/30/50). En el caso de D<sub>10</sub> tampoco hubo diferencia significativa con respecto al control a excepción de los tratamientos 9, 11, 12 y 15 (132/30/50, 266/20/50, 266/40/50 y 266/30/50 respectivamente). Para los valores de D<sub>50</sub> solamente presentaron diferencia significativa con respecto al control los tratamientos 5, 9, 10 y 15 (345/24/20, 132/30/50, 400/30/50 y 266/30/50 respectivamente). En cuanto a los valores de D<sub>90</sub> ningún tratamiento presentó diferencias significativas con respecto al control.

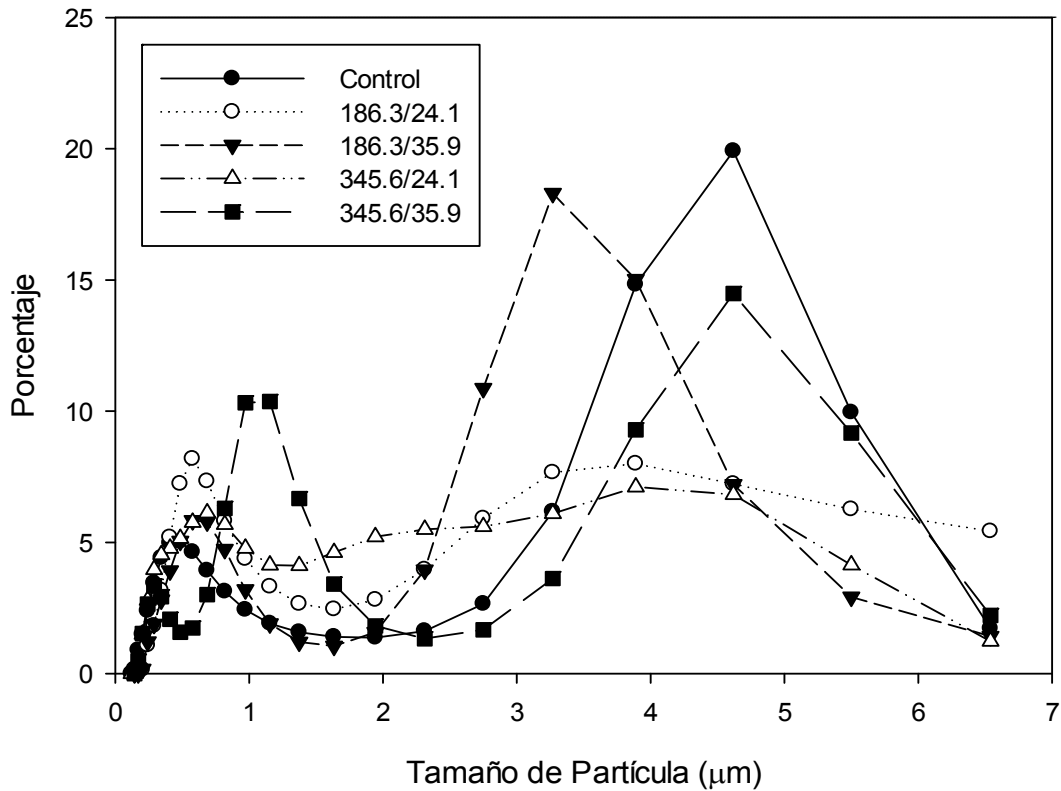
Todos los valores obtenidos fueron mayores que los publicados en investigaciones anteriores, como el caso de mezcla para helado con diferentes concentraciones de proteína (Alvarez *et al.*, 2005), mezcla para helado tratada con AP (Innocente *et al.*, 2009; Zimmermann-

---

Stein, 2011), leche entera sometida a tratamientos de US (Villamiel & de Jong, 2000), leche entera tratada con AP (Pereda *et al.*, 2007) y yogurt sometido a tratamientos de TS (Riener *et al.*, 2009b). La razón de que los valores de tamaño de partícula en este trabajo fueran mayores se puede deber a que las matrices alimenticias de estudio y los tratamientos son diferentes. Tal es el caso de los tratamientos con AP ya que aun cuando hay formación de aglomerados debido a una mayor exposición de la interfase grasa (Hayes *et al.*, 2005) el tamaño de partícula del GG es menor puesto que existe una buena homogeneización (Innocente *et al.*, 2009; Pereda *et al.*, 2007)

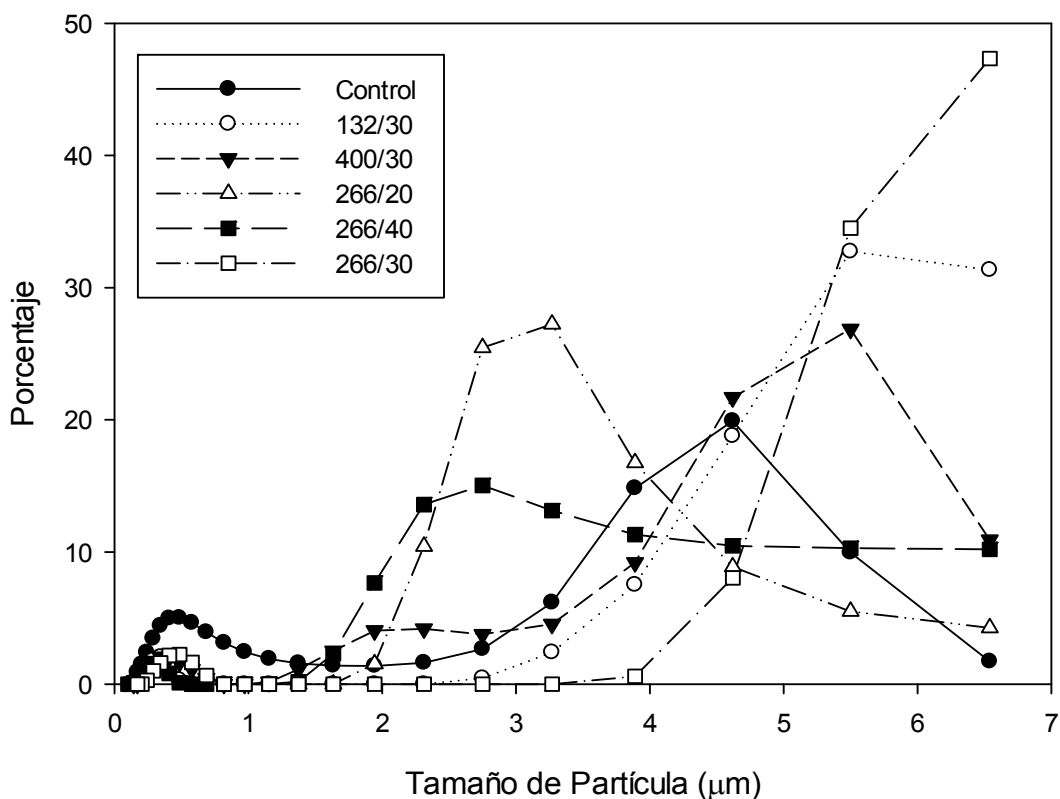
Analizando las distribuciones de tamaño de partícula de la mezcla termosonicada se observa que todas tienen un comportamiento bimodal con un grupo de partículas alrededor de 0.5  $\mu\text{m}$  y un segundo grupo arriba de 2  $\mu\text{m}$  (Figuras 13, 14 y 15). El primer grupo hace referencia a las micelas de caseína mientras que el segundo grupo se atribuye a los glóbulos de grasa derivados de la leche y la crema (Méndez-Velasco & Goff, 2011; Pereda *et al.*, 2007). Este comportamiento es similar al reportado por Innocente *et al.* (2009) para su tratamiento control que también presenta un comportamiento bimodal. Por el contrario, sus muestras tratadas con altas presiones mostraron un comportamiento monomodal marcado con diámetros medios más pequeños con respecto al grupo principal del tratamiento control. En el caso de los tratamientos con TS no se muestra el comportamiento monomodal observado con altas presiones, esto puede deberse a la presencia de aglomerados causados por la desestabilización de la grasa (Boode *et al.*, 1991, 1993). Conforme la desestabilización aumenta, la distribución del tamaño de partícula se convierte más bimodal representando coalescencia parcial o total de la grasa (Goff *et al.*, 1999).

Para el caso de los tratamientos de mezcla termosonicada con un 20% de estabilizante en su formulación (Figura 13), se observa que con energías específicas bajas (24.1 J/mL) el primer grupo de partículas, relacionado con las caseínas, incrementa su porcentaje y tamaño de partícula, mientras que el segundo grupo disminuye su porcentaje en comparación con el tratamiento control. Por su parte, los tratamientos con altas energías específicas (35.9 J/mL) presentan un comportamiento similar en el primer grupo de partículas, pero en el segundo grupo, a pesar de que el porcentaje disminuye con respecto al control, es mayor que los tratamientos con intensidades bajas. El menor tamaño de partícula medio se presentó en el caso del tratamiento con alta potencia y baja energía específica (345.6 W y 24.1 J/mL).



**Figura 13.** Distribuciones de tamaño de partícula para mezcla termosónica con 20% de estabilizante.

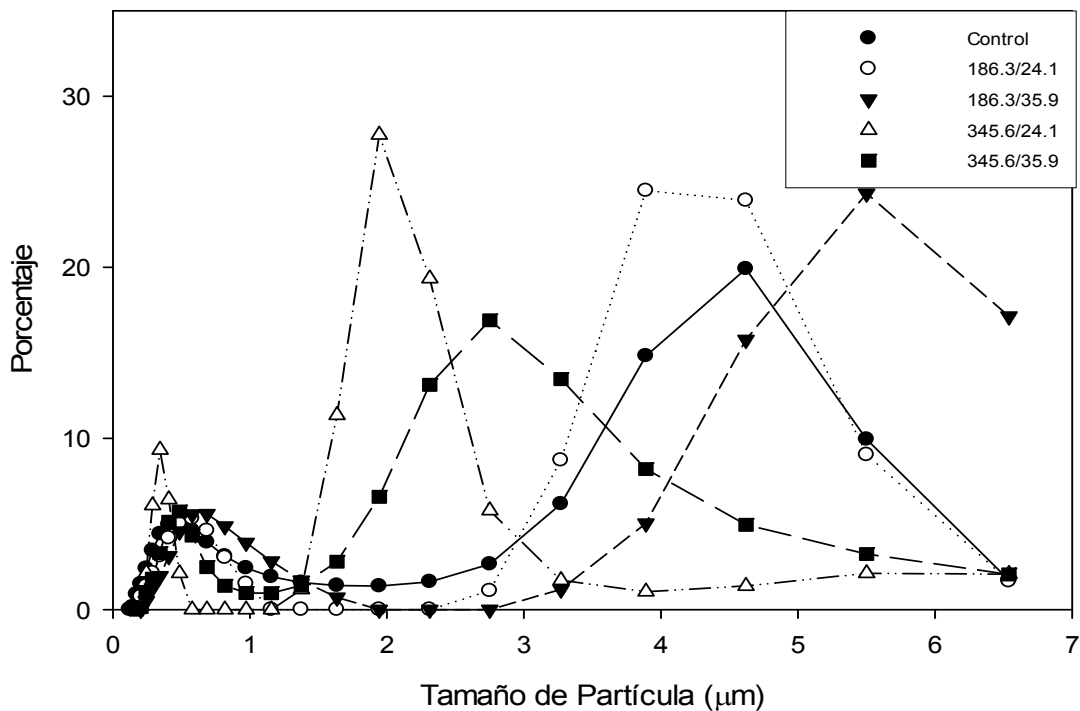
Las distribuciones para los tratamientos con 50% de estabilizante en su formulación se comportaron de manera diferente, ya que en todos los casos el grupo de partículas de menor tamaño se redujo aproximadamente un 50% o más comparado con el tratamiento control (Figura 14). Se sugiere que este grupo de partículas va desapareciendo debido a la desagregación inducida por el tratamiento con US y/o a la adsorción en la nueva membrana de glóbulo graso formada (Biasutti *et al.*, 2013; Innocente *et al.*, 2009). Este comportamiento se puede explicar con base en que el tratamiento con US disminuye el tamaño de las partículas e incrementa la superficie libre del material (Jambrak *et al.*, 2014), pero hay veces en las que la superficie creada es demasiada y no es suficiente la membrana de glóbulo graso disponible para cubrirla, por lo que se recurre a las caseínas para completar el recubrimiento haciendo que disminuya el porcentaje de las partículas pequeñas y aumentando el tamaño del glóbulo de grasa (Barford *et al.*, 1991; Caldwell *et al.*, 1992), además de que se forman aglomerados y hay coalescencia de glóbulos de grasa, lo que contribuye al aumento en el porcentaje del grupo con tamaños de partícula mayores (Boode *et al.*, 1993).



**Figura 14.** Distribuciones de tamaño de partícula para mezcla termosónica con 50% de estabilizante.

En el segundo grupo de partículas se observa que para energías específicas menores (20 J/mL) se reduce el tamaño, para energías específicas medias (30 J/mL) aumenta el tamaño, y para energías específicas altas (40 J/mL) se presenta nuevamente una disminución en el tamaño de partícula. Se sabe por estudios previos (Roach & Harte, 2008; Sandra & Dalgleish, 2005) que existe un límite crítico de reducción de tamaño, que si se excede, propicia el incremento de tamaño de las partículas dispersas en la leche. Al incrementar la energía específica (40 J/mL) en el tratamiento con US puede resultar en un rompimiento de aglomerados y agregados que se pudieran formar previamente, además de que contribuye a un mayor desdoblamiento y desnaturalización de las proteínas. Esta desnaturalización provoca que las proteínas incrementen su capacidad surfactante y tengan una capacidad emulsificante mayor, lo que ocasiona que el tamaño del glóbulo de grasa se mantenga en un menor tamaño (Alvarez *et al.*, 2005; Jambrak *et al.*, 2014).

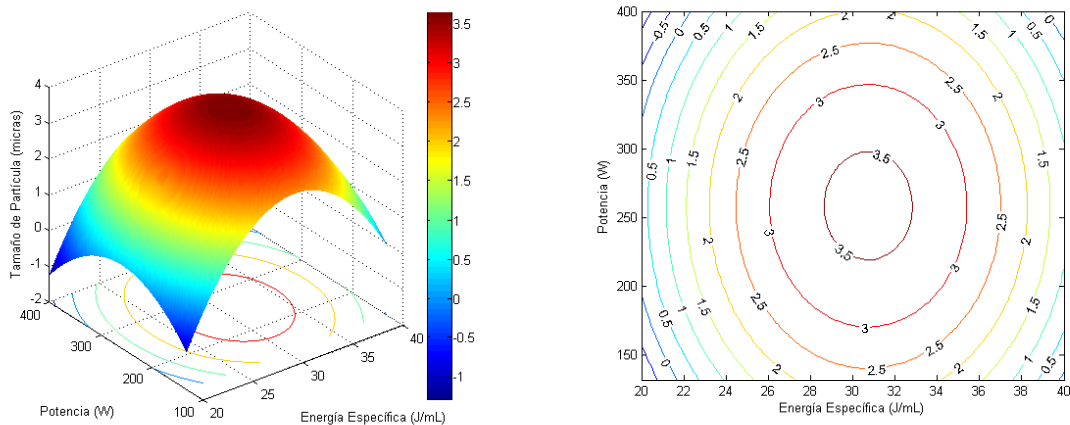
Para el caso de las distribuciones de tamaño de partícula de las mezclas con 80% de estabilizante en su formulación se observa que el primer grupo de partículas se mantiene casi constante en todos los casos con respecto al tratamiento control, mientras que para el segundo grupo de partículas se obtuvieron tamaños menores cuando se utilizaron potencias mayores (345.6 W) y cuando se disminuyó la potencia (186.3 W), el tamaño de partícula fue en aumento (Figura 15). Una vez más la desnaturalización proteica juega un papel importante en el tamaño reportado, además del tiempo de sonicación, ya que para valores altos de energía específica (>40 J/mL) y potencias bajas (<186 W) el tiempo es mayor que para los tratamientos con energías específicas bajas (<20 J/mL) y potencias altas (>345 W).



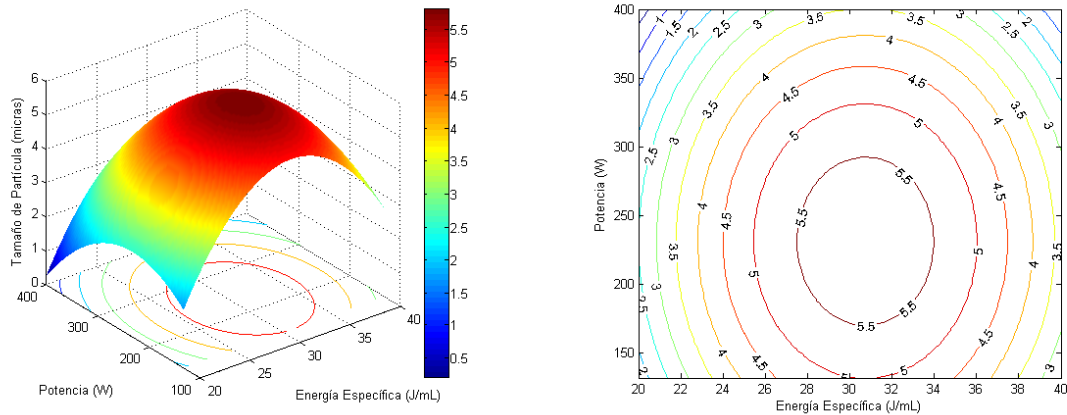
**Figura 15.** Distribuciones de tamaño de partícula para mezcla termosónica con 80% de estabilizante.

De acuerdo al análisis de regresión del valor  $D_{50}$  ( $R^2=0.83$ ), se observa que los factores potencia y estabilizante así como los tres factores cuadráticos fueron significativos ( $P<0.05$ ). Además, se observa que el factor potencia mostró un efecto negativo mientras que los factores energía específica y estabilizante mostraron un efecto positivo (Apéndice C.3.3).

En los valores experimentales para tamaño medio de partícula de los tratamientos con un 20% de estabilizante en su formulación, se observa un comportamiento parabólico, encontrando valores significativamente bajos en las esquinas del plano potencia-energía específica (Figura 16). Analizando los valores experimentales se deduce que a mayores valores de energía específica (>30 J/mL) se obtiene un tamaño de partícula mayor y por otra parte el tamaño de partícula disminuye cuando se aumenta la potencia (>300 W). Además se observa que los tratamientos con energías específicas bajas (<30 J/mL) provocan una disminución del tamaño de glóbulo de grasa en comparación al control y a medida que se aumenta la energía específica, el tamaño de partícula también lo hace hasta llegar a un punto de máximo tamaño, alrededor del punto central, y este empieza a disminuir una vez pasado ese punto. Para la potencia se aprecia un comportamiento similar al de la energía específica pero inverso; los valores de tamaño mínimo se encuentran localizados en los tratamientos con mayor potencia y conforme esta disminuye, el tamaño va aumentando. En la Figura 17 se presentan los resultados de los tratamientos con un 50% de estabilizante en la mezcla. El comportamiento es similar al de los tratamientos con 20% de estabilizante, pero se puede apreciar un tamaño medio de partícula más grande.

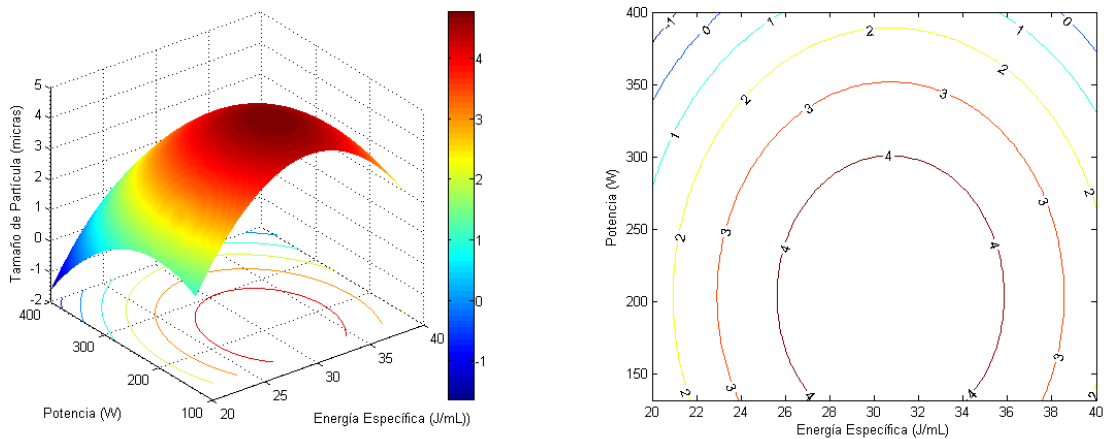


**Figura 16.** Gráficas de superficie y de contornos del tamaño del glóbulo de grasa en mezclas termosónicas con un 20% de estabilizante



**Figura 17.** Gráficas de superficie y de contornos del tamaño del glóbulo de grasa en mezclas termosónicas con un 50% de estabilizante.

De igual manera para los tratamientos con 80% de estabilizante (figura 18), se denota un comportamiento parabólico a medida que se aumenta la energía específica, pero para el caso de la potencia ya no es tan marcada la disminución del tamaño de partícula una vez alcanzado el punto máximo, debido probablemente a la protección extra que la mezcla recibe del estabilizante que se encuentra en mayor proporción.



**Figura 18.** Gráficas de superficie y de contornos del tamaño del glóbulo de grasa en mezclas termosónicas con un 80% de estabilizante.

---

#### 5.4. Influencia de la termosonicación en la incorporación de aire.

Los valores de IA obtenidos resultaron ser significativamente bajos en comparación con los reportados en bibliografía, los cuales van de 40 hasta 120% dependiendo de la formulación (Flores & Goff, 1999; Inoue *et al.*, 2008; Muse & Hartel, 2004; Roland *et al.*, 1999; Sofjan & Hartel, 2004). Esto se atribuye al tipo de proceso empleado, dado que el congelado se llevó a cabo en un intercambiador de calor de superficie raspada de tipo lote, además de que la cantidad de muestra procesada fue significativamente menor (Akalin *et al.*, 2008; Rezaei *et al.*, 2011). Se sabe que uno de los factores que influyen en la IA es la desestabilización de la grasa (Sofjan & Hartel, 2004). Generalmente, grandes desestabilizaciones de grasa ocurren más en congeladores continuos que en congeladores por lote. La razón de esto es porque en los congeladores por lote hay una insuficiente fuerza de corte en las aspas raspadoras durante el batido (BahramParvar *et al.*, 2012). Los valores de IA obtenidos variaron entre 20 y 27.78% para las mezclas dependiendo de su composición y el tratamiento de US utilizado (Tabla 9).

Se puede observar que todos los valores de IA obtenidos en los tratamientos experimentales fueron mayores a los presentados por el control; esto se puede atribuir a la incorporación de burbujas de aire más pequeñas (Eisner *et al.*, 2005) relacionadas directamente a los cambios en las propiedades reológicas de la mezcla durante el batido (Chang & Hartel, 2002b). Analizando los valores obtenidos en la regresión para el parámetro IA ( $R^2=0.72$ ) se observa que el factor lineal energía específica fue significativo ( $P<0.05$ ) mostrando un efecto positivo, por lo que a mayor energía específica se obtendrá una mayor IA. Los factores potencia y estabilizante no fueron significativos ( $P>0.05$ ) pero mostraron un efecto negativo y positivo respectivamente. La interacción energía específica-estabilizante fue significativa y mostro un efecto antagónico. Los tres factores cuadráticos también fueron significativos, lo que indica un efecto de curvatura para las interacciones de los factores lineales (Apéndice C.4.1).

No hubo diferencias significativas ( $P<0.05$ ) entre los valores de IA encontrados excepto para el tratamiento en el punto central del diseño y el control. Los valores máximos para la IA en los helados con un 20% de estabilizante se obtuvieron a energías específicas altas ( $>36$  J/mL) (Figura 19).

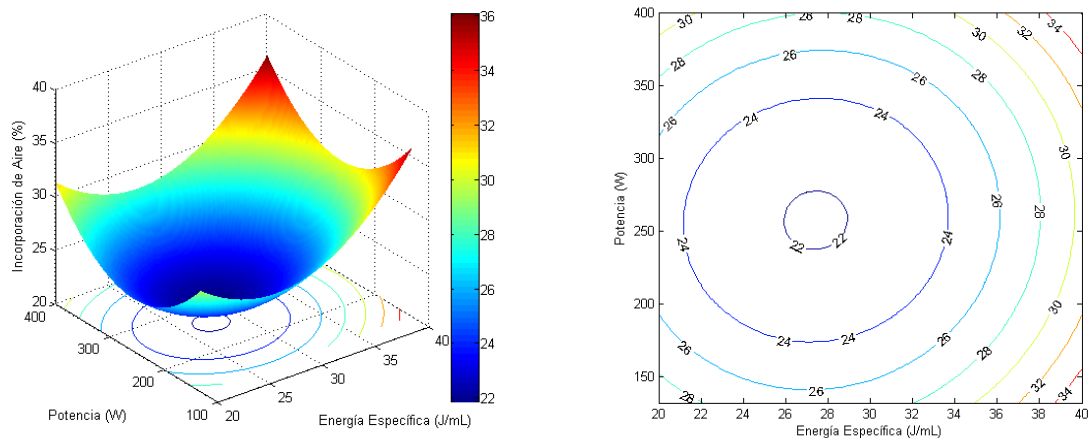
**Tabla 9.** Valores obtenidos para la incorporación de aire en los helados termosonicados.<sup>1</sup>

Tratamiento <sup>2</sup>	Incorporación de Aire
Control	20.00 ± 0.00 <sup>c</sup>
186/24/20	23.33 ± 1.57 <sup>abc</sup>
186/24/80	27.78 ± 1.57 <sup>a</sup>
186/36/20	27.78 ± 1.57 <sup>a</sup>
186/36/80	26.67 ± 0.00 <sup>ab</sup>
345/24/20	25.56 ± 1.57 <sup>abc</sup>
345/24/80	25.56 ± 1.57 <sup>abc</sup>
345/36/20	27.78 ± 1.57 <sup>a</sup>
345/36/80	25.56 ± 1.57 <sup>abc</sup>
132/30/50	27.78 ± 1.57 <sup>a</sup>
400/30/50	25.56 ± 1.57 <sup>abc</sup>
266/20/50	25.56 ± 1.57 <sup>abc</sup>
266/40/50	27.78 ± 1.57 <sup>a</sup>
266/30/0	24.44 ± 0.00 <sup>abc</sup>
266/30/100	25.56 ± 1.57 <sup>abc</sup>
266/30/50	21.11 ± 1.57 <sup>bc</sup>

Medias que no comparten una misma letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

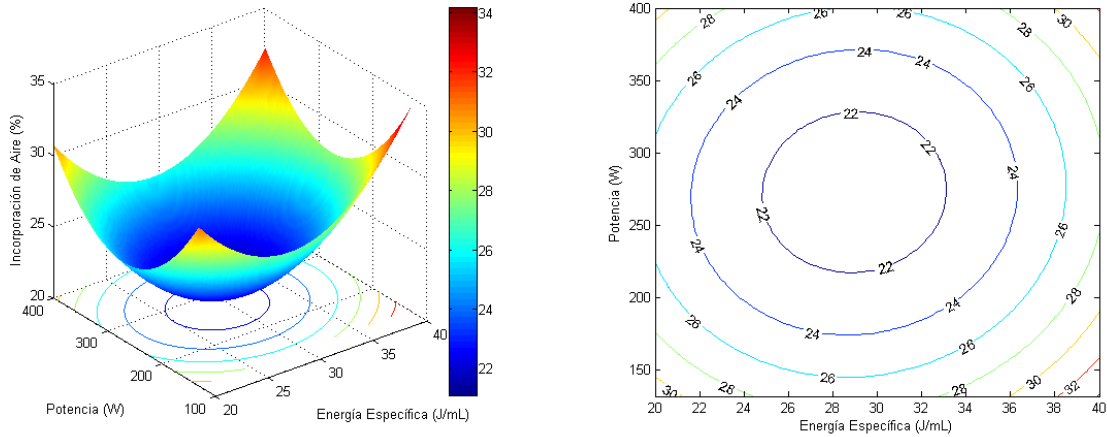
<sup>1</sup> Promedio de duplicados.

<sup>2</sup> Los valores en el nombre del tratamiento se refieren a potencia, energía específica y cantidad de estabilizante respectivamente.



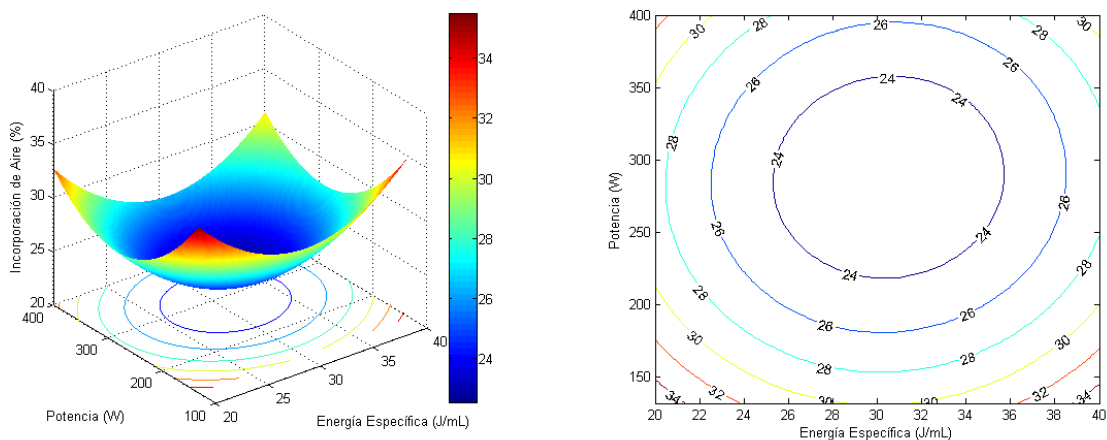
**Figura 19.** Gráficas de superficie y de contornos de la incorporación de aire en helados termosonicados con un 20% de estabilizante.

Para los helados con un 50% de estabilizante se obtuvo la máxima IA a energías específicas menores de 24 J/mL y mayores de 36 J/mL (Figura 20)



**Figura 20.** Gráficas de superficie y de contornos de la incorporación de aire en helados termosonicados con un 50% de estabilizante.

Finalmente para los helados con un 80% de estabilizante en su formulación se obtuvieron los máximos valores a energías específicas bajas (<24 J/mL<sup>-1</sup>) y a energías específicas altas/potencias bajas (>36 J/mL<sup>-1</sup> y <200 W) (Figura 21).



**Figura 21.** Gráficas de superficie y de contornos de la incorporación de aire en helados termosonicados con un 80% de estabilizante.

---

Los valores máximos de IA para las mezclas con baja concentración de estabilizante (<20%) que se obtuvieron a energías específicas altas (>36 J/mL) se atribuyen a la formación de agregados grasa-proteína y grasa-emulsificante (Goff, 2011), además de altas tasas de coalescencia parcial (Caldwell *et al.*, 1992) debido a las grandes fuerzas de corte efectuadas por la cavitación. Para el caso de las mezclas con alta concentración de estabilizante (>80%), la viscosidad presentada por los hidrocoloides protege a las proteínas de la desnaturalización ocasionada por el US. A medida que avanza el tratamiento con US, la viscosidad otorgada por los estabilizantes disminuye (Iida *et al.*, 2008; Kaltsa *et al.*, 2013) y la desnaturalización proteica se lleva a cabo pero en menor proporción. Aun así, las proteínas adquieren diferentes propiedades de emulsificación, batido y capacidad de retención de agua (E. *et al.*, 2010; Marinova *et al.*, 2009).

### **5.5. Influencia de la termosonicación en la firmeza.**

Los datos experimentales (Tabla 10) indican que la firmeza se incrementa a medida que se incrementa la cantidad de estabilizante, esto contradice al estudio realizado por Soukoulis *et al.*, (2008) en helado, ya que ellos observan que a medida que se incrementa la concentración de los estabilizantes, la firmeza disminuía. Ellos atribuyen sus resultados a la capacidad crio-protectora de los estabilizantes, ya que controlan la difusión del agua entre fases e incrementan la microviscosidad de la fase sérica, lo que lleva a una prevención del crecimiento de los cristales de hielo causantes del incremento en la firmeza (Bolliger *et al.*, 2000).

La firmeza puede estar relacionada con los valores de IA y los de viscosidad aparente de la mezcla. A pesar de que no se encontró una correlación clara entre los valores de viscosidad aparente y la firmeza ( $R^2=$ , se pudo observar una tendencia positiva donde los valores más bajos de firmeza se localizan a viscosidades bajas (<80 cp), mientras que a viscosidades altas (>300 cp) se encuentran valores más altos. Este comportamiento coincide con el trabajo de Muse & Hartel (2004) en mezcla para helado estándar y con el trabajo de Innocente *et al.* (2009) en mezcla para helado baja en grasa, ya que reportan que a medida que se incrementa la viscosidad aparente, la firmeza también se incrementaba. Esto es atribuible a la resistencia de las muestras a la penetración por la alta viscosidad presentada (Muse & Hartel, 2004) y al resultado de la formación de redes interpenetradas de la matriz alimenticia por efectos de AP (Innocente *et al.*, 2009). En el caso de la IA, se observó una tendencia negativa donde los valores más bajos de firmeza se

localizan a IA altas (>25%) y valores altos de firmeza se localizaban a IA bajas (<25%). Muse & Hartel (2004) reportan que a medida que la IA se incrementa la firmeza disminuía debido a que un volumen más grande de una fase dispersa compresible conduce a una menor resistencia a una fuerza aplicada (Hartel *et al.*, 2003).

**Tabla 10.** Valores obtenidos para la firmeza en los helados termosonicados.

<b>Tratamiento<sup>2</sup></b>	<b>Firmeza<sup>1</sup></b>
<b>Control</b>	7.57 ± 0.08 <sup>b</sup>
<b>186/24/20</b>	6.88 ± 0.04 <sup>b</sup>
<b>186/24/80</b>	2.30 ± 0.21 <sup>de</sup>
<b>186/36/20</b>	4.28 ± 0.49 <sup>cd</sup>
<b>186/36/80</b>	2.16 ± 0.07 <sup>e</sup>
<b>345/24/20</b>	1.72 ± 0.04 <sup>e</sup>
<b>345/24/80</b>	7.46 ± 0.53 <sup>b</sup>
<b>345/36/20</b>	7.89 ± 0.34 <sup>b</sup>
<b>345/36/80</b>	15.99 ± 0.97 <sup>a</sup>
<b>132/30/50</b>	4.67 ± 0.11 <sup>c</sup>
<b>400/30/50</b>	3.02 ± 0.17 <sup>cde</sup>
<b>266/20/50</b>	8.33 ± 1.24 <sup>b</sup>
<b>266/40/50</b>	7.97 ± 0.14 <sup>b</sup>
<b>266/30/0</b>	7.29 ± 0.07 <sup>b</sup>
<b>266/30/100</b>	7.33 ± 0.28 <sup>b</sup>
<b>266/30/50</b>	7.42 ± 0.83 <sup>b</sup>

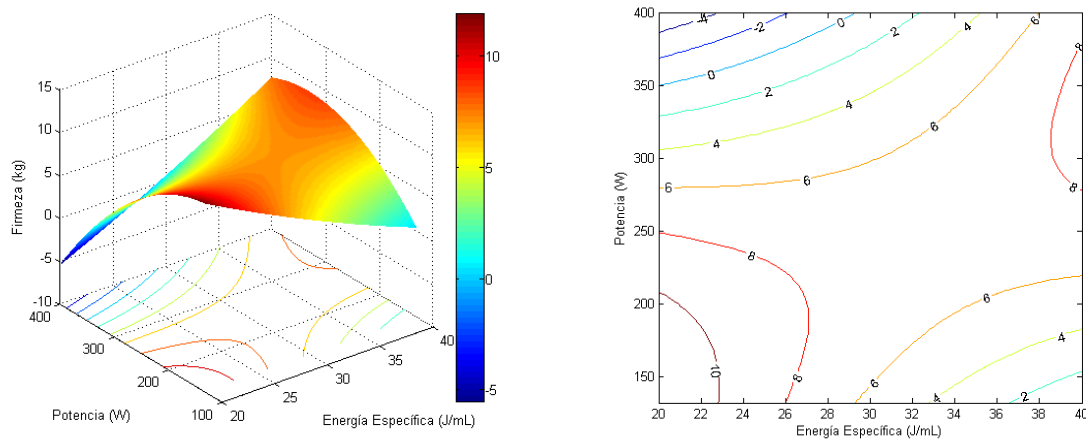
Medias que no comparten una misma letra son significativamente diferentes (P<0.05).

<sup>1</sup> Promedio de duplicados.

<sup>2</sup> Los valores en el nombre del tratamiento se refieren a potencia, energía específica y cantidad de estabilizante respectivamente.

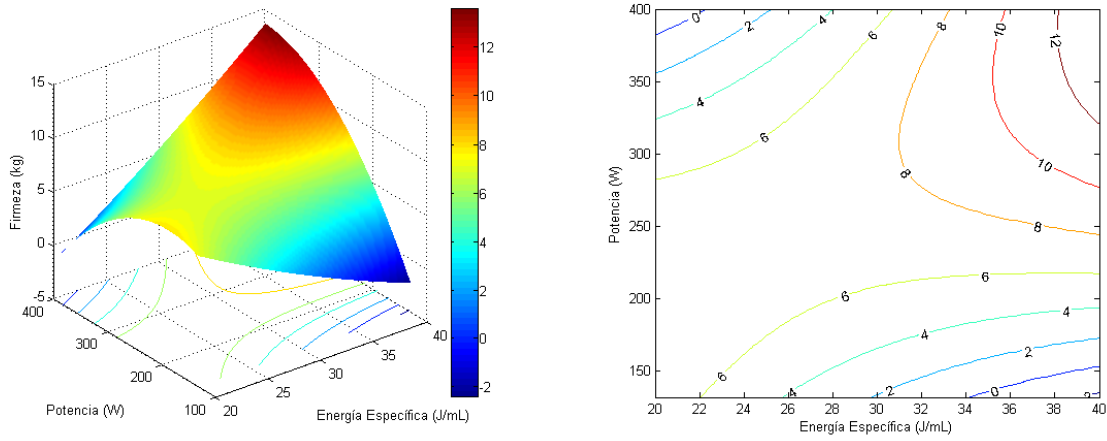
Como se observa en la Tabla 10, no hubo diferencia significativa (P<0.05) con respecto al control a excepción de los tratamientos 2, 3, 4, 5, 8, 9 y 10 (186/24/80, 186/36/20, 186/36/80, 345/24/20, 345/36/80, 132/30/50 y 400/30/50 respectivamente), ya que el tratamiento 8 presentó una firmeza mayor (15.99 kg) que el control (7.57 kg) y los tratamientos 2, 3, 4, 5, 9 y 10 presentaron una firmeza menor que el control (entre 1.72 y 4.67 kg). Los valores obtenidos de la regresión del parámetro firmeza (R<sup>2</sup>=0.80) indican que los factores lineales potencia y energía

específica fueron significativos ( $P < 0.05$ ), además de las interacciones potencia-energía específica y potencia-estabilizante y el factor cuadrático de la potencia. Los tres factores lineales mostraron un efecto positivo, por lo que a medida que se aumentaban los factores, la firmeza se incrementaba (Apéndice C.5.1). Los valores de firmeza mínimos para los helados con 20% de estabilizante en su formulación se encontraron a potencias altas/energías específicas bajas ( $>345$  W y  $< 24$  J/mL) y a potencias bajas/energías específicas altas ( $< 266$  W y  $> 36$  J/mL) (Figura 22). Este comportamiento se puede deber a que a potencias altas/energías específicas bajas, posiblemente se realiza una adecuada homogeneización, por lo que se presentan tamaños de partícula más pequeños. En cambio, para potencias bajas/energías específicas altas, los componentes pueden ser más susceptibles a la formación de aglomerados, pero la intensidad del tratamiento puede ser suficiente para romperlos.

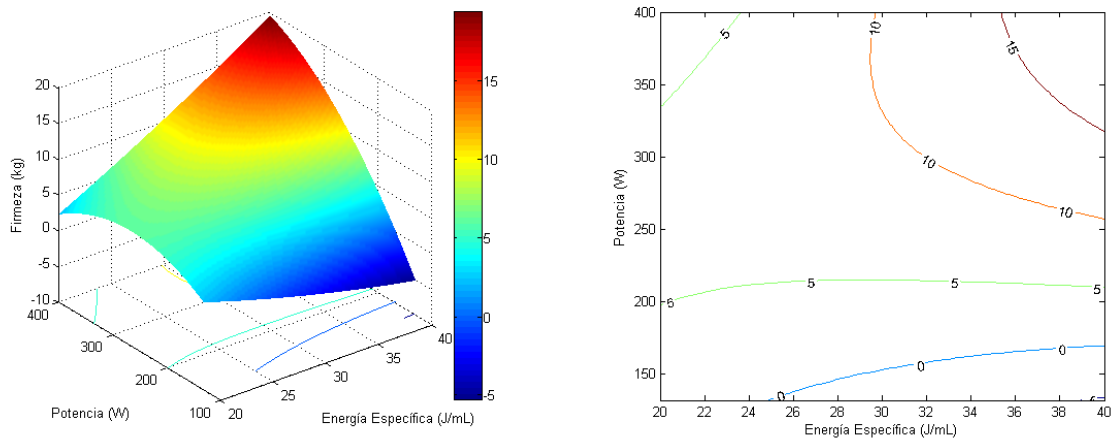


**Figura 22.** Gráficas de superficie y de contornos de la firmeza en helados termosonicados con un 20% de estabilizante.

Para los helados con 50 y 80% de estabilizante en su formulación (Figuras 23 y 24) se presenta un comportamiento similar al de los tratamientos con 20% de estabilizante, pero se denota un incremento significativo en la firmeza a potencias altas/energías específicas altas ( $>266$  W y  $> 36$  J/mL), esto posiblemente porque se ha alcanzado el límite crítico de reducción de tamaño (Roach & Harte, 2008; Sandra & Dagleish, 2005) y además hay presencia de aglomerados, lo que deriva en un tamaño de partícula más grande (Boode *et al.*, 1993).



**Figura 23.** Gráficas de superficie y de contornos de la firmeza en helados termosonicados con un 50% de estabilizante.



**Figura 24.** Gráficas de superficie y de contornos de la firmeza en helados termosonicados con un 80% de estabilizante.

## 5.6. Influencia de la termosonicación en la velocidad de drenado.

La velocidad de drenado de las muestras de helado y el tiempo que tardó en caer la primera gota se resumen en la Tabla 11. Existe una relación entre la velocidad y el inicio del drenado, por lo tanto hay una correspondencia entre la estabilidad del helado y la primera gota drenada. En este caso, una pendiente menos pronunciada significa una mayor resistencia al drenado del producto final (Zimmermann-Stein, 2011). Además se puede observar una correlación lineal negativa entre la velocidad de drenado y el tiempo en que tardó en caer la primer gota de helado derretido (Figura 25).

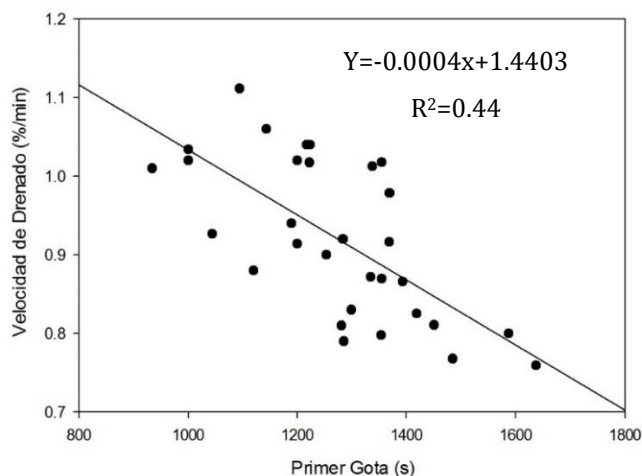
**Tabla 11.** Velocidad de drenado e inicio de drenado en helados con diferentes tratamientos de TS.<sup>1</sup>

<b>Tratamiento<sup>2</sup></b>	<b>Drenado (%/min)</b>	<b>Inicio de drenado (s)</b>
<b>Control</b>	0.83 ± 0.06 <sup>efg</sup>	1419 ± 267.29 <sup>ab</sup>
<b>186/24/20</b>	1.00 ± 0.03 <sup>abcd</sup>	1285 ± 119.50 <sup>ab</sup>
<b>186/24/80</b>	1.03 ± 0.02 <sup>ab</sup>	1280 ± 80.96 <sup>ab</sup>
<b>186/36/20</b>	1.03 ± 0.01 <sup>ab</sup>	1111 ± 156.98 <sup>b</sup>
<b>186/36/80</b>	1.03 ± 0.02 <sup>ab</sup>	1286 ± 97.23 <sup>ab</sup>
<b>345/24/20</b>	0.79 ± 0.01 <sup>fg</sup>	1320 ± 48.79 <sup>ab</sup>
<b>345/24/80</b>	0.90 ± 0.03 <sup>cdef</sup>	1082 ± 53.74 <sup>b</sup>
<b>345/36/20</b>	0.89 ± 0.04 <sup>def</sup>	1319 ± 50.20 <sup>ab</sup>
<b>345/36/80</b>	0.82 ± 0.01 <sup>efg</sup>	1375 ± 107.13 <sup>ab</sup>
<b>132/30/50</b>	0.89 ± 0.03 <sup>defg</sup>	1297 ± 136.47 <sup>ab</sup>
<b>400/30/50</b>	0.89 ± 0.02 <sup>defg</sup>	1294 ± 57.63 <sup>ab</sup>
<b>266/20/50</b>	1.02 ± 0.01 <sup>abc</sup>	967 ± 46.32 <sup>b</sup>
<b>266/40/50</b>	0.93 ± 0.02 <sup>bcde</sup>	1279 ± 126.93 <sup>ab</sup>
<b>266/30/0</b>	0.78 ± 0.03 <sup>g</sup>	1612 ± 35.36 <sup>a</sup>
<b>266/30/100</b>	1.09 ± 0.04 <sup>a</sup>	1119 ± 34.65 <sup>b</sup>
<b>266/30/50</b>	0.79 ± 0.03 <sup>fg</sup>	1383 ± 143.90 <sup>ab</sup>

Medias que no comparten una misma letra son significativamente diferentes (P<0.05).

<sup>1</sup> Promedio de duplicados.

<sup>2</sup> Los valores en el nombre del tratamiento se refieren a potencia, energía específica y cantidad de estabilizante respectivamente.

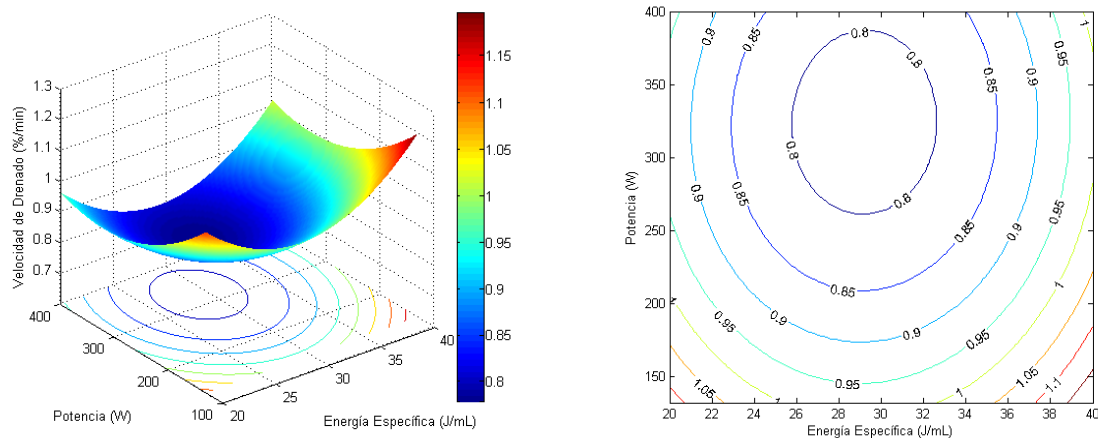


**Figura 25.** Correlación que existe entre la velocidad de drenado y el tiempo en que tarda en caer la primer gota.

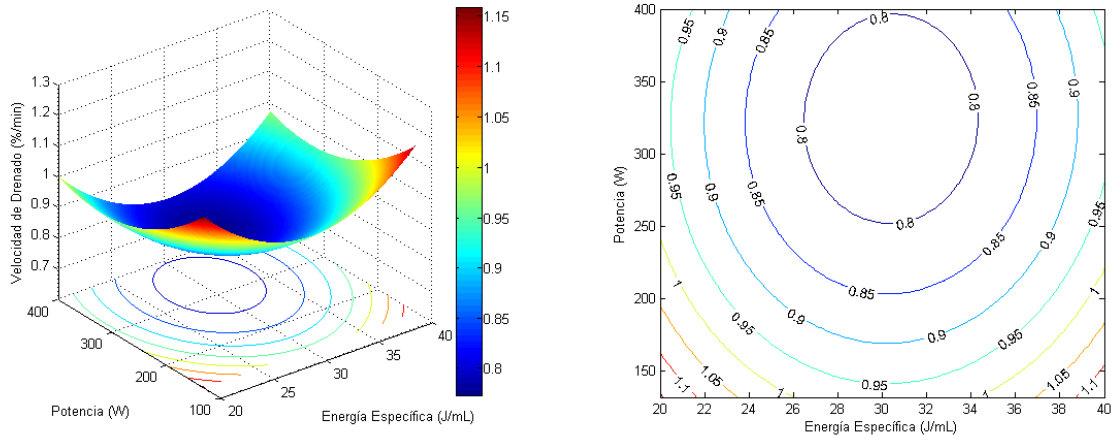
Los valores obtenidos para la velocidad de drenado fueron mayores que los reportados en trabajos anteriores (Alvarez *et al.*, 2005; Bolliger *et al.*, 2000; Muse & Hartel, 2004; Sofjan & Hartel, 2004) para helados con polisorbato 80 en su formulación pero similares a aquellos que solo incluían mono y diglicéridos. Este comportamiento se puede atribuir a la posible interacción del polisorbato 80 en la interfase de aire. Esto contribuye a una mayor desestabilización de la grasa de la matriz alimenticia, presentando así las diferencias en el mecanismo de drenado de los helados (Goff *et al.*, 1999). A pesar de que no se obtuvo una correlación alta entre los valores de la velocidad de drenado y la viscosidad, se puede apreciar una tendencia lineal negativa lo que sugiere que la resistencia al fundido es mayor a viscosidades altas. Estos resultados son similares a los obtenidos en investigaciones recientes (Biasutti *et al.*, 2013; Huppertz *et al.*, 2011; Innocente *et al.*, 2009; Rezaei *et al.*, 2011) en mezcla para helado y se puede atribuir este comportamiento al contenido de hidrocoloides, la desnaturalización proteica y el tamaño de partícula (Muse & Hartel, 2004; Sofjan & Hartel, 2004; Soukoulis *et al.*, 2008). La razón de esto es que con el incremento de la microviscosidad del suero más tiempo es requerido por el agua para ser difundida en la fase concentrada del suero antes de comenzar a fluir del interior del helado hacia el exterior de este (BahramParvar *et al.*, 2012).

Se puede observar en el análisis de regresión para el parámetro velocidad de fundido ( $R^2=0.62$ ) que los factores lineales potencia y estabilizante fueron significativos ( $P<0.05$ ), además de los factores cuadráticos para energía específica y estabilizante. El factor lineal estabilizante

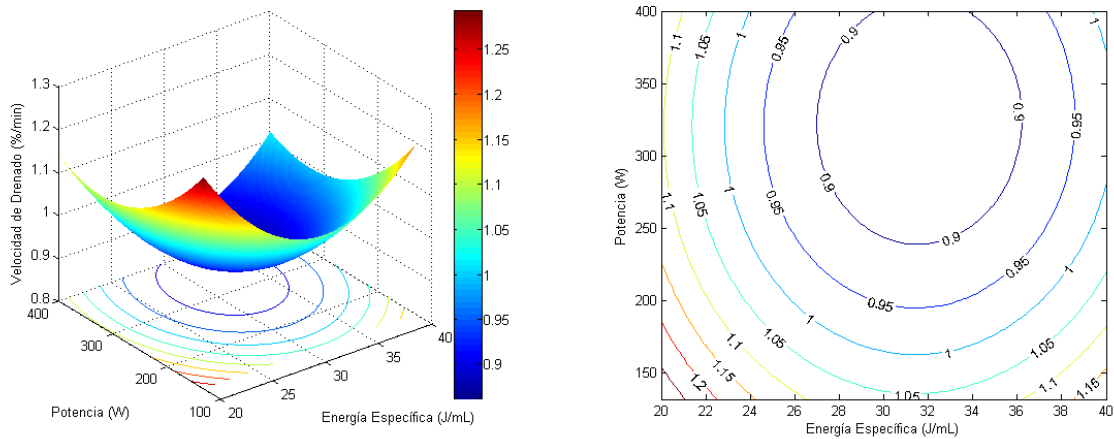
mostró un efecto positivo mientras que los factores lineales potencia y energía específica mostraron un efecto negativo (Apéndice C.6.1). Para el caso del análisis de regresión para el parámetro primera gota ( $R^2=0.59$ ), solamente el factor lineal estabilizante y el factor cuadrático para energía específica fueron significativos. Los factores potencia y energía específica mostraron un comportamiento positivo mientras que el factor estabilizante mostró un efecto negativo (Apéndice C.6.2). Como se observa en la Tabla 11, los valores de velocidad de drenado no presentan diferencia significativa ( $P<0.05$ ) con respecto al control a excepción de los tratamientos 1, 2, 3, 4, 11 y 14 (186/24/20, 186/24/80, 186/36/20, 186/36/80, 266/20/50 y 266/30/100 respectivamente). Para el caso del inicio de drenado no hubo diferencia significativa con respecto al control. Para los helados con una concentración del 20% de estabilizante en su formulación se obtuvieron las pendientes menores cuando se utilizaron potencias altas ( $>266$  W) y energías específicas entre 25 y 35 J/mL (Figura 26). Esto se puede atribuir a un tamaño de partícula mayor por los aglomerados proteína-grasa y por coalescencia parcial debida al US, ya que niveles altos de grasa desestabilizada incrementa la red de grasa y por consiguiente reduce la velocidad de fundido del helado y promueve la retención de forma. Además, los glóbulos de grasa en coalescencia parcial son responsables por rodear y estabilizar las células de aire en el helado (Clarke, 2004). Koxholt *et al.* (2001) encontraron que la velocidad de drenado del helado depende del tamaño de partícula del glóbulo de grasa, ya que los helados elaborados con mezcla homogeneizada a 30 y 6 MPa tenían glóbulos pequeños y estos fundían más rápido que los helados elaborados a presiones más bajas.



**Figura 26.** Gráficas de superficie y de contornos de la velocidad de drenado en mezclas termosónicas con un 20% de estabilizante.



**Figura 27.** Gráficas de superficie y de contornos de la velocidad de drenado en mezclas termosónicas con un 50% de estabilizante.



**Figura 28.** Gráficas de superficie y de contornos de la velocidad de drenado en mezclas termosónicas con un 80% de estabilizante.

Los tratamientos con 50 y 80% de estabilizante (Figuras 27 y 28) se comportan de una manera similar a los anteriores, pero denotan velocidades significativamente más rápidas en los extremos del plano potencia/energía específica. Lo anterior concuerda con los datos mostrados para altas IA, ya que aunque no se pudo obtener una buena correlación entre la IA y la velocidad de drenado se observó una tendencia que mostraba velocidades más altas para IA más grandes.

Además, se ha demostrado en estudios anteriores (Biasutti *et al.*, 2013; Innocente *et al.*, 2009) que existe una relación positiva entre la IA y la velocidad de drenado de los helados. Los tratamientos con baja concentración de estabilizante (<50%) mostraron velocidades más lentas que los tratamientos con alta concentración (>80%) por lo tanto se sugiere una desnaturalización proteica mayor en estos tratamientos.

## 5.7. Optimización de los tratamientos.

En la Tabla 12 se muestran los valores de los parámetros  $\beta$  obtenidos de las regresiones que se utilizaron para la optimización de los tratamientos. Como se mencionó anteriormente, el modelo se ajustó con las condiciones de que se obtuviera la mayor IA cuando la textura fuera entre 7 y 8 kg de fuerza y la velocidad de drenado fuera menor de 0.95 (%/min). Además se buscó que uno de los tratamientos optimizados no tuviera estabilizante en su formulación y el otro tuviera alrededor del 50%.

**Tabla 12.** Parámetros utilizados para la optimización de los tratamientos.

Parámetros	Incorporación de Aire	Textura	Velocidad de Drenado
$\beta_0$	21.1426	7.4790	0.7894
$\beta_1$	-0.3550	1.0733	-0.0493
$\beta_2$	0.6805	0.8299	-0.0072
$\beta_3$	0.2182	0.5278	0.0423
$\beta_4$	-0.1389	2.1801	-0.0019
$\beta_5$	-0.6945	2.5666	0.0006
$\beta_6$	-0.9722	0.6013	-0.0256
$\beta_7$	1.9205	-1.3426	0.0342
$\beta_8$	1.9205	0.1800	0.0642
$\beta_9$	1.3313	-0.1177	0.0501

En la Tabla 13 se observan los resultados obtenidos para los factores en la optimización, estos valores son los que se utilizaron para llevar a cabo los diferentes tratamientos. Además se muestran las respuestas arrojadas por el modelo cuadrático que son los valores obtenidos para las condiciones de  $x_1$  (potencia),  $x_2$  (energía específica) y  $x_3$  (estabilizante) especificadas.

**Tabla 13.** Factores obtenidos y respuestas teóricas esperadas de los tratamientos óptimos.

<b>Parámetros</b>	<b>Óptimo 1</b>	<b>Óptimo 2</b>
$x_1$	1.68	-0.60
$x_2$	0.68	0.40
$x_3$	-0.22	-1.68
<b>IA (%)</b>	27.58	26.00
<b>Textura (kg)</b>	7.47	7.15
<b>Drenado (%/min)</b>	0.82	0.93

En la Tabla 14 se resumen los valores de los factores convertidos a los que se sometieron los tratamientos optimizados. Se puede observar que la energía específica es ligeramente diferente mientras que el valor de potencia del Óptimo 2 con respecto al Óptimo 1 es de aproximadamente el 50%.

**Tabla 14.** Tratamientos óptimos y sus factores convertidos.

<b>Tratamiento</b>	<b>Potencia (W)</b>	<b>Energía Específica (J/mL)</b>	<b>Estabilizante (%)</b>
<b>Control</b>	0	0.0	100.0
<b>Óptimo 1</b>	400	34.1	43.5
<b>Óptimo 2</b>	202.8	33.2	0.0

Los valores reales obtenidos después de haber sometido la mezcla para helado a los tratamientos óptimos de US se pueden observar en la Tabla 15. A pesar de que los valores reales

son ligeramente menores que los esperados, el análisis de comparación de medias de Tukey nos indica que no presentan una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) con respecto al teórico, esto quiere decir que los valores proyectados mediante el uso del modelo obtenido serán aproximados a los valores empíricos reales, por lo tanto se puede decir que los modelos de regresión obtenidos para IA, textura y velocidad de drenado, a partir de los cuales se basó el método de optimización, son satisfactorios.

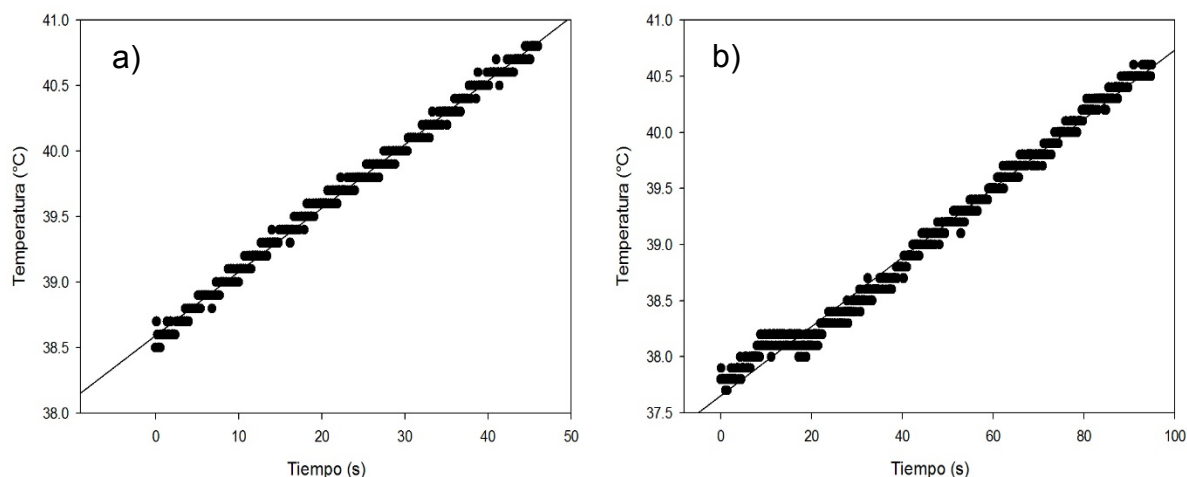
**Tabla 15.** Comparación de los valores teóricos con los valores obtenidos de los tratamientos óptimos.

Tratamiento	IA (%)		Textura (kg)		Drenado (%/min)	
	Teórico	Real	Teórico	Real	Teórico	Real
<b>Óptimo 1</b>	27.58 <sup>A</sup>	27 <sup>A</sup>	7.47 <sup>A</sup>	7.16 <sup>A</sup>	0.82 <sup>A</sup>	0.8 <sup>A</sup>
<b>Óptimo 2</b>	26 <sup>A</sup>	25.75 <sup>A</sup>	7.15 <sup>A</sup>	6.9 <sup>A</sup>	0.93 <sup>A</sup>	0.91 <sup>A</sup>

Medias en las filas que no comparten una misma letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

## 5.8. Calorimetría.

El US se considera una energía mecánica, por lo que una parte de ella se disipa en forma de calor cuando este pasa a través del medio. Para poder calcular la potencial real obtenida por el US se necesita obtener primero el  $C_p$  de las mezclas utilizadas. Después de realizar los cálculos se obtuvieron los valores 3.2770 y 3.2771 kJ/kg°C para las mezclas con 0 y 50% de estabilizante respectivamente, por lo que al observar que los valores son prácticamente similares se optó por utilizar un solo valor de 3.27 kJ/kg°C. Mediante el uso de regresiones lineales se obtuvo el valor de la pendiente de la temperatura con respecto al tiempo. Los valores fueron 0.486 y 0.308 para el óptimo 1 y el óptimo 2 respectivamente (Figura 29). Sustituyendo los valores obtenidos en la Formula 4 se obtuvo que la potencia real aplicada al medio fue de 101.3W y 60.6W para los tratamientos óptimo 1 y óptimo 2 respectivamente.



**Figura 29.** Regresiones de los tratamientos óptimos para 400W (a) y 200W (b).

En este estudio solo se calculó la potencia real de los dos tratamientos óptimos y no de todo el diseño experimental debido al alto gasto energético asociado, además de que solo se pretendía obtener estos valores como base para tener una idea general de la intensidad de los tratamientos.

## 5.9. Influencia de la termosonicación en el análisis sensorial.

Se realizó la evaluación sensorial de las formulaciones establecidas como óptimas en la etapa previa, comparando los resultados con el del control, esto con el fin de observar en qué medida percibían los evaluadores el impacto del tratamiento de US sobre las mezclas. Se sabe que las proteínas están relacionadas con la supresión de la liberación del flavor al ligar los compuestos relacionados a este (Guichard, 2002). Un incremento en la desnaturalización de la proteína debido a los tratamientos con US, podría causar un incremento en el ligado de los compuestos del flavor (Preininger, 2006). Por lo antes mencionado se esperaría que las muestras tratadas con US presentaran un menor olor y sabor a vainilla, pero el análisis de Friedman no mostró una significancia estadística ( $P=0.0626$  y  $P=0.3385$  respectivamente). Además, el análisis de ordenamiento de rangos tampoco mostró una diferencia significativa entre tratamientos (Tablas 16 y 17).

**Tabla 16.** Valores obtenidos para el parámetro olor a vainilla.

	<b>Pasteurizado</b>	<b>Óptimo 1</b>	<b>Óptimo 2</b>	<b>Total</b>
<b>Juicios</b>	48	48	48	144
<b>Suma Rango</b>	83 <sup>a</sup>	105 <sup>a</sup>	100 <sup>a</sup>	288
<b>Rango Medio</b>	1.73	2.19	2.08	2

Medias que no comparten una misma letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

**Tabla 17.** Valores obtenidos para el parámetro sabor a vainilla.

	<b>Pasteurizado</b>	<b>Óptimo 1</b>	<b>Óptimo 2</b>	<b>Total</b>
<b>Juicios</b>	48	48	48	144
<b>Suma Rango</b>	88 <sup>a</sup>	102 <sup>a</sup>	98 <sup>a</sup>	288
<b>Rango Medio</b>	1.83	2.13	2.04	2

Medias que no comparten una misma letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

La gomosidad en los helados está relacionada con una alta resistencia al fundido y cuando este ocurre las muestras generalmente tienden a retener su forma original. Una gomosidad alta en los helados se asocia con un excesivo uso de estabilizantes en la formulación (Marshall *et al.*, 2003), en este caso también podría deberse a una alta desnaturalización proteica. Se debe hacer hincapié en que todos los helados tienen algún grado de gomosidad debido a la concentración de carbohidratos contenidos en ellos. Un helado debe de ser cuestionado solamente cuando la gomosidad sea tan severa que se vuelve obvia (sensación plástica al degustar el helado) y además dificulta su ingesta (Clark *et al.*, 2009). Nuevamente, el análisis de Friedman realizado no mostró una significancia estadística ( $P = 0.1325$ ) y el análisis de ordenamiento de rangos tampoco mostró una diferencia significativa entre tratamientos (Tabla 18).

**Tabla 18.** Valores obtenidos para el parámetro gomosidad.

	<b>Pasteurizado</b>	<b>Óptimo 1</b>	<b>Óptimo 2</b>	<b>Total</b>
<b>Juicios</b>	48	48	48	144
<b>Suma Rango</b>	107 <sup>a</sup>	88 <sup>a</sup>	93 <sup>a</sup>	288
<b>Rango Medio</b>	2.23	1.83	1.94	2

Medias que no comparten una misma letra son significativamente diferentes (P<0.05).

Una textura arenosa en los helados es ciertamente uno de los defectos en la textura más objetables, pero además es fácil de detectar. Cuando la muestra se lleva a la boca y se derrite, quedan residuos de partículas finas, duras y uniformes que parecieran arena, pero son cristales de lactosa (Clark *et al.*, 2009). El análisis de Friedman mostró una significancia estadística (P=0.0009) y en las muestras evaluadas se percibió una diferencia significativa entre el tratamiento pasteurizado (detectado como arenoso) y los tratamientos con US (Tabla 19). Esto puede atribuirse a que la desnaturalización proteica asociada con el US aumentó de manera significativa la microviscosidad de la mezcla para helado, aumentando el efecto crio-protector y evitando así una alta incidencia de cristales de lactosa (Goff, 2002; Regand & Goff, 2002). Soukoulis *et al.* (2008) encontraron que la arenosidad como resultado de una excesiva solubilidad de la lactosa debido al exceso de congelamiento de suero fue detectada en algunas de sus muestras pero no pudieron correlacionarla con el tipo o porcentaje de hidrocoloides estabilizantes ni con la presencia de la  $\kappa$ -carragenina.

**Tabla 19.** Valores obtenidos para el parámetro arenosidad.

	<b>Pasteurizado</b>	<b>Óptimo 1</b>	<b>Óptimo 2</b>	<b>Total</b>
<b>Juicios</b>	48	48	48	144
<b>Suma Rango</b>	117 <sup>a</sup>	88 <sup>b</sup>	83 <sup>b</sup>	288
<b>Rango Medio</b>	2.44	1.83	1.73	2

Medias que no comparten una misma letra son significativamente diferentes (P<0.05).

Cuando las mezclas para helado se someten a tratamientos con US, además de modificar sus características funcionales (IA, CRA, capacidad de batido, etc.), se pueden llevar a cabo reacciones en los componentes que favorezcan la formación de radicales libres (H y OH). Los radicales OH se pueden recombinar conduciendo a la aparición de especies reactivas con oxígeno como el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Chouliara *et al.*, 2010; Riener *et al.*, 2009a). Estas reacciones pueden conducir a la percepción de lo que se conoce como sabor metálico. En las muestras analizadas no se percibió una diferencia significativa entre tratamientos, y el análisis de Friedman no mostró una significancia estadística (P=0.3385) (Tabla 20).

**Tabla 20.** Valores obtenidos para el parámetro sabor metálico.

	<b>Pasteurizado</b>	<b>Óptimo 1</b>	<b>Óptimo 2</b>	<b>Total</b>
<b>Juicios</b>	48	48	48	144
<b>Suma Rango</b>	90 <sup>a</sup>	104 <sup>a</sup>	94 <sup>a</sup>	288
<b>Rango Medio</b>	1.88	2.17	1.96	2

Medias que no comparten una misma letra son significativamente diferentes (P<0.05).

Para el caso de la evaluación de preferencia o nivel de agrado, el IR obtenido entre el tratamiento óptimo 1 y el pasteurizado fue de 0.648. Esto nos indica que el 64.8% de las veces que se comparen estas dos muestras, las personas elegirán el tratamiento óptimo 1 sobre el pasteurizado (Tabla 21). Por otra parte, al comparar el tratamiento óptimo 2 con el pasteurizado el IR que se obtiene es de 0.5812 lo que indica que el 58.12% de las ocasiones que comparen estas dos muestras se preferirá el tratamiento óptimo 2 sobre el pasteurizado (Tabla 22). Por los resultados anteriores se observa que los tratamientos con US se prefieren sobre el pasteurizado pero al realizar la comparación de los tratamientos óptimos, el IR obtenido es de 0.5812 lo que indica que el 58.12% de las ocasiones que se comparen estos dos tratamientos se preferirá el óptimo 1 sobre el óptimo 2 (Tabla 23). Al calcular la significancia estadística para n=48, el valor crítico de tablas nos indica que es estadísticamente significativo para las comparaciones óptimo 1/pasteurizado, óptimo 2/pasteurizado y óptimo 1/óptimo 2.

---

**Tabla 21.** Valores de frecuencia para la comparación del tratamiento óptimo 1 con el control.

<b>Tratamiento</b>	<b>Mayor Agrado</b>		<b>Menor Agrado</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Óptimo 1</b>	21	17	10
<b>Pasteurizado</b>	13	11	24

**Tabla 22.** Valores de frecuencia para la comparación del tratamiento óptimo 2 con el control.

<b>Tratamiento</b>	<b>Mayor Agrado</b>		<b>Menor Agrado</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Óptimo 2</b>	14	20	14
<b>Pasteurizado</b>	13	11	24

**Tabla 23.** Valores de frecuencia para la comparación del tratamiento óptimo 1 con el óptimo 2.

<b>Tratamiento</b>	<b>Mayor Agrado</b>		<b>Menor Agrado</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Óptimo 1</b>	21	17	10
<b>Óptimo 2</b>	14	20	14

---

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Las mezclas y helados elaborados con bajo contenido de estabilizante en su formulación (<20%) presentaron los valores mínimos para tamaño de partícula y firmeza y los valores máximos para luminosidad. Se presentó una mayor IA y una menor viscosidad con respecto al control y la velocidad de drenado fue similar al tratamiento control. En las mezclas y helados con contenido intermedio de estabilizantes (50%) se observó el máximo tamaño de partícula y la máxima viscosidad, además de que se obtuvo una luminosidad y una IA mayor con respecto al control. En el caso de la firmeza y la velocidad de drenado los valores fueron similares al tratamiento control. Para el caso de las mezclas y helados con alto contenido de estabilizantes (>80%) se obtuvieron los valores máximos de firmeza y velocidad de drenado, una luminosidad e IA mayores que el control, una mayor variabilidad en el tamaño de partícula y una viscosidad similar al control.
- No se pudo obtener una correlación clara del efecto del US en las propiedades de la mezcla y del helado duro pero se puede denotar ciertas tendencias esperadas en algunas propiedades tales como la viscosidad, la IA y la luminosidad que aumentaban y la firmeza que disminuía cuando el tratamiento con US era más intenso. También se encontró que las propiedades de tamaño de partícula y velocidad de drenado no presentaron el comportamiento esperado ya que estas aumentaban cuando el tratamiento con US era más intenso.
- De acuerdo al análisis sensorial realizado se puede observar que las personas no encontraron diferencias entre el pasteurizado y los tratados con US, excepto en el parámetro de arenosidad que fue mayormente percibida en el pasteurizado. Por medio del análisis de preferencia se estableció que a las personas tuvieron un agrado mayor hacia los helados con un porcentaje disminuido de estabilizante y tratados por US que hacia los helados pasteurizados. Además se puede concluir que el tratamiento óptimo en donde se obtienen propiedades funcionales y sensoriales similares al control pero con una mejor

---

aceptación es con potencias altas (aproximadamente 400W), energías específicas alrededor de los 30 J/mL y una cantidad aproximada de 50% de estabilizante.

- Los tratamientos obtenidos por optimización incorporaban cantidades menores al 50% del estabilizante recomendado en una formulación comercial. Por tanto el US demostró ser un proceso capaz de modificar satisfactoriamente las propiedades funcionales y sensoriales de las mezclas para helado y por consecuencia de los helados duros, emulando en la mayoría de los casos las propiedades de un tratamiento control y en otros casos obteniendo mejores propiedades. Con base en los resultados mostrados se puede aseverar que es posible elaborar un helado duro de etiqueta limpia que presente características similares o superiores a las de un helado duro comercial.

El presente trabajo es innovador en su campo y como tal se detectan inconvenientes a lo largo de su desarrollo, aun así se espera que con esta investigación se establezca una base que brinde la información preliminar para proyectos subsecuentes. Por esta razón se hacen las siguientes recomendaciones:

- Realizar un análisis calorimétrico exhaustivo antes de iniciar con los tratamientos del diseño experimental para así tener la certeza de cuanta potencia se está entregando al medio y poder relacionarla con sus propiedades.
- Fijar un nivel único de potencia en el diseño experimental e ir variando el tiempo de los tratamientos para observar el comportamiento de acuerdo a la intensidad del tratamiento con US.
- Establecer como uno de los factores del diseño experimental la densidad energética (W/mL), ya que este factor podría explicar mejor el comportamiento de las propiedades funcionales de la mezcla.

---

## VII. BIBLIOGRAFIA.

- Adapa, S., Dingeldein, H., Schmidt, K. A., & Herald, T. J. (2000). Rheological Properties of Ice Cream Mixes and Frozen Ice Creams Containing Fat and Fat Replacers. *Journal of Dairy Science*, 83(10), 2224–2229. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)75106-X
- Adekunte, a. O., Tiwari, B. K., Cullen, P. J., Scannell, a. G. M., & O'Donnell, C. P. (2010). Effect of sonication on colour, ascorbic acid and yeast inactivation in tomato juice. *Food Chemistry*, 122(3), 500–507. doi:10.1016/j.foodchem.2010.01.026
- Adleman, R., & Hartel, R. W. (2001). Lipid crystallization and its effect on the physical structure of ice cream. In N. Garti & K. Sato (Eds.), *Crystallization processes in fats and lipid systems*. (pp. 381–427). New York: Marcel Dekker Inc.
- Aime, D. B., Arnt, S. D., Malcolmson, L. J., & Ryland, D. (2001). Textural analysis of fat reduced vanilla ice cream products, 34.
- Akalın, A. S., Karagözlü, C., & Ünal, G. (2008). Rheological properties of reduced-fat and low-fat ice cream containing whey protein isolate and inulin. *European Food Research and Technology*, 227(3), 889–895. doi:10.1007/s00217-007-0800-z
- Alvarez, V. B., Wolters, C. L., Vodovotz, Y., & Ji, T. (2005). Physical properties of ice cream containing milk protein concentrates. *Journal of Dairy Science*, 88(3), 862–71. doi:10.3168/jds.S0022-0302(05)72752-1
- Arancibia, C., Castro, C., Jublot, L., Costell, E., & Bayarri, S. (2014). Colour, rheology, flavour release and sensory perception of dairy desserts. Influence of thickener and fat content. *LWT - Food Science and Technology*, 1–9. doi:10.1016/j.lwt.2014.08.024
- Ashokkumar, M. (2011). The characterization of acoustic cavitation bubbles - An overview. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 864–872. doi:10.1016/j.ultsonch.2010.11.016

- 
- Awad, T. S., Moharram, H. a., Shaltout, O. E., Asker, D., & Youssef, M. M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*, 48(2), 410–427. doi:10.1016/j.foodres.2012.05.004
- Bahramparvar, M., & Mazaheri-Tehrani, M. (2011). Application and Functions of Stabilizers in Ice Cream. *Food Reviews International*, 27(4), 389–407. doi:10.1080/87559129.2011.563399
- BahramParvar, M., Razavi, S. M. A., & Khodaparast, M. H. H. (2010). Rheological Characterization and Sensory Evaluation of a Typical Soft Ice Cream Made with Selected Food Hydrocolloids. *Food Science and Technology International*, 16(1), 79–88. doi:10.1177/1082013209353244
- BahramParvar, M., Razavi, S. M. A., & Mazaheri-Tehrani, M. (2012). Optimising the ice cream formulation using basil seed gum ( *Ocimum basilicum* L.) as a novel stabiliser to deliver improved processing quality. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(12), 2655–2661. doi:10.1111/j.1365-2621.2012.03148.x
- Barford, N. M., Krog, N., Larsen, G., & Buchheim, W. (1991). Effects of Emulsifiers on Protein-Fat Interaction in Ice Cream Mix during Ageing I: Quantitative Analyses. *Lipid / Fett*, 93(1), 24–29. doi:10.1002/lipi.19910930104
- Bearth, A., Cousin, M. E., & Siegrist, M. (2014). The consumer's perception of artificial food additives: Influences on acceptance, risk and benefit perceptions. *Food Quality and Preference*, 38, 14–23. doi:10.1016/j.foodqual.2014.05.008
- Berk, Z. (2013). Thermal Processing. In *Food Process Engineering and Technology* (second ed., pp. 399–420). San Diego: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-415923-5.00017-4
- Bermúdez-Aguirre, D., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2012). Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in pineapple, grape and cranberry juices under pulsed and continuous thermo-sonication treatments. *Journal of Food Engineering*, 108, 383–392. doi:10.1016/j.jfoodeng.2011.06.038
- Bermúdez-Aguirre, D., Mobbs, T., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2011). Ultrasound Applications in Food Processing. In H. Feng, G. Barbosa-Canovas, & J. Weiss (Eds.), *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing SE - 3* (pp. 65–105). Springer New York. doi:10.1007/978-1-4419-7472-3\_3.

- 
- Bermúdez-Aguirre, D., Mawson, R., Versteeg, K., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2009). Composition Properties, Physicochemical Characteristics and Shelf Life of Whole Milk After Thermal and Thermo-Sonication Treatments. *Journal of Food Quality*, 32(3), 283–302.
- Beverung, C. J., Radke, C. J., & Blanch, H. W. (1999). Protein adsorption at the oil/water interface: characterization of adsorption kinetics by dynamic interfacial tension measurements. *Biophysical Chemistry*, 81(1), 59–80. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10520251>
- Biasutti, M., Venir, E., Marino, M., Maifreni, M., & Innocente, N. (2013). Effects of high pressure homogenisation of ice cream mix on the physical and structural properties of ice cream. *International Dairy Journal*, 32(1), 40–45. doi:10.1016/j.idairyj.2013.03.007
- Bixler, H. J., Johndro, K., & Falshaw, R. (2001). Kappa-2 carrageenan : structure and performance of commercial extracts II . Performance in two simulated dairy applications, 15.
- Blanco-Salgado, C., & Maldonado-Hernandez, M. (2011). Comparación del rendimiento de emulsificantes en la elaboración de un fluido de baja densidad. Universidad Veracruzana.
- Boode, K., Bisperink, C., & Walstra, P. (1991). Destabilization of O/W emulsions containing fat crystals by temperature cycling. *Colloids and Surfaces*, 61(0), 55–74. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0166-6622\(91\)80299-4](http://dx.doi.org/10.1016/0166-6622(91)80299-4)
- Boode, K., Walstra, P., & de Groot-Mostert, A. E. A. (1993). Partial coalescence in oil-in-water emulsions 2. Influence of the properties of the fat. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 81(0), 139–151. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0927-7757\(93\)80240-F](http://dx.doi.org/10.1016/0927-7757(93)80240-F)
- Brockman, C., & Beeren, C. J. M. (2011). Additives in Dairy Foods | Consumer Perceptions of Additives in Dairy Products. In E.-C. J. W. Fuquay (Ed.), *Encyclopedia of Dairy Sciences* (Second Edition) (Second Edi., pp. 41–48). San Diego: Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-374407-4.00003-0
- Buchert, J., Ercili Cura, D., Ma, H., Gasparetti, C., Monogioudi, E., Faccio, G., ... Kruus, K. (2010). Crosslinking Food Proteins for Improved Functionality. *Annual Review of Food Science and Technology*, 1(1), 113–138. doi:10.1146/annurev.food.080708.100841

- 
- Caldwell, K. B., Goff, H. D., & Stanley, D. W. (1992). A low temperature scanning electron microscopy study of ice cream. I. Techniques and general microstructure. *Food Structure*, 11, 1–9.
- Caulfield, W. J., & Martin, W. H. (1933). The Use of Vegetable Stabilizers in Ice Cream. *Journal of Dairy Science*, 16(3), 265–270. doi:[http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(33\)93337-8](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(33)93337-8)
- Cevoli, C., Balestra, F., Ragni, L., & Fabbri, A. (2013). Rheological characterisation of selected food hydrocolloids by traditional and simplified techniques. *Food Hydrocolloids*, 33(1), 142–150. doi:10.1016/j.foodhyd.2013.02.022
- Chandrapala, J., Martin, G. J. O., Kentish, S. E., & Ashokkumar, M. (2014). Dissolution and reconstitution of casein micelle containing dairy powders by high shear using ultrasonic and physical methods. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(5), 1658–65. doi:10.1016/j.ultsonch.2014.04.006
- Chandrapala, J., Martin, G. J. O., Zisu, B., Kentish, S. E., & Ashokkumar, M. (2012). The effect of ultrasound on casein micelle integrity. *Journal of Dairy Science*, 95(12), 6882–6890. doi:10.3168/jds.2012-5318
- Chandrapala, J., Zisu, B., Palmer, M., Kentish, S. E., & Ashokkumar, M. (2011). Effects of ultrasound on the thermal and structural characteristics of proteins in reconstituted whey protein concentrate. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(5), 951–7. doi:10.1016/j.ultsonch.2010.12.016
- Chang, Y., & Hartel, R. . (2002a). Stability of air cells in ice cream during hardening and storage. *Journal of Food Engineering*, 55(1), 59–70. doi:10.1016/S0260-8774(01)00242-4
- Chang, Y., & Hartel, R. W. (2002b). Development of air cells in a batch ice cream freezer. *Journal of Food Engineering*, 55(1), 71–78. doi:10.1016/S0260-8774(01)00243-6
- Ching, M., Ling, N., Aniza, Y., & Saleena, F. (2014). Gel Strength and Stability Characterization of Ultrasound Treated Whey Protein Foams. *Italian Oral Surgery*, 2, 144–149. doi:10.1016/j.aaspro.2014.11.021
- Chouliara, E., Georgogianni, K. G., Kanellopoulou, N., & Kontominas, M. G. (2010). Effect of ultrasonication on microbiological, chemical and sensory properties of raw, thermized and pasteurized milk. *International Dairy Journal*, 20(5), 307–313. doi:10.1016/j.idairyj.2009.12.006
-

- 
- Clark, S., Costello, M., Drake, M., & Bodyfelt, F. (2009). *The Sensory Evaluation of Dairy Products* (2nd ed.). New York: Springer.
- Clarke, C. (2004). Science of Ice Cream (pp. X001–X004). The Royal Society of Chemistry. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1039/9781847552150>
- Color Converter. (2013). Retrieved March 06, 2015, from <http://www.workwithcolor.com/color-converter-01.htm>
- Considine, T., Patel, H., Anema, S. G., Singh, H., & Creamer, L. K. (2007). Interactions of milk proteins during heat and high hydrostatic pressure treatments — A Review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8(1), 1–23. doi:10.1016/j.ifset.2006.08.003
- Cottrell, J. I. L., Pass, G., & Phillips, G. O. (1980). The effect of stabilisers on the viscosity of an ice cream mix. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 31(10), 1066–1070. doi:10.1002/jsfa.2740311015
- Cravotto, G., Boffa, L., Mantegna, S., Perego, P., Avogadro, M., & Cintas, P. (2008). Improved extraction of vegetable oils under high-intensity ultrasound and/or microwaves. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(5), 898–902. doi:10.1016/j.ultsonch.2007.10.009
- Demirdöven, A., & Baysal, T. (2008). The Use of Ultrasound and Combined Technologies in Food Preservation. *Food Reviews International*, 25(1), 1–11. doi:10.1080/87559120802306157
- Devi, A. F., Buckow, R., Singh, T., Hemar, Y., & Kasapis, S. (2015). Colour change and proteolysis of skim milk during high pressure thermal-processing. *Journal of Food Engineering*, 147, 102–110. doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.09.017
- Dogan, M., & Kayacier, A. (2007). The Effect of Ageing at a Low Temperature on the Rheological Properties of Kahramanmaras-Type Ice Cream Mix. *International Journal of Food Properties*, 10(1), 19–24. doi:10.1080/10942910600610729
- Dubey, U. K., & White, C. H. (1997). Ice Cream Shrinkage: A Problem for the Ice Cream Industry. *Journal of Dairy Science*, 80(12), 3439–3444. doi:10.3168/jds.S0022-0302(97)76320-3
- E., X., Pei, Z. J., & Schmidt, K. A. (2010). Ice Cream: Foam Formation and Stabilization—A Review. *Food Reviews International*, 26(2), 122–137. doi:10.1080/87559120903564472

- 
- Earnshaw, R. G., Appleyard, J., & Hurst, R. M. (1995). Understanding physical inactivation processes: combined preservation opportunities using heat, ultrasound and pressure. *International Journal of Food Microbiology*, 28(2), 197–219. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8750667>
- Ebringerová, a, & Hromádková, Z. (1997). The effect of ultrasound on the structure and properties of the water-soluble corn hull heteroxytan. *Ultrasonics Sonochemistry*, 4, 305–309. doi:10.1016/S1350-4177(97)00037-0
- Eisner, M. D., Wildmoser, H., & Windhab, E. J. (2005). Air cell microstructuring in a high viscous ice cream matrix. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 263(1-3), 390–399. doi:10.1016/j.colsurfa.2004.12.017
- Erkaya, T., Başlar, M., Sengül, M., & Ertugay, M. F. (2014). Effect of thermosonication on physicochemical, microbiological and sensorial characteristics of ayran during storage. *Ultrasonics Sonochemistry*, 23, 406–412. doi:10.1016/j.ultsonch.2014.08.009
- Fang, X., Mark, G., & von Sonntag, C. (1996). OH radical formation by ultrasound in aqueous solutions Part I: the chemistry underlying the terephthalate dosimeter. *Ultrasonics Sonochemistry*, 3, 57–63. doi:10.1016/1350-4177(95)00032-1
- Farhoosh, R., & Riazi, A. (2007). A compositional study on two current types of salep in Iran and their rheological properties as a function of concentration and temperature. *Food Hydrocolloids*, 21(4), 660–666. doi:10.1016/j.foodhyd.2006.07.021
- Fellows, P. 2000. *Food processing technology. Principles and practice*. 2nd Edición. CRC/Woodhead Publishing Ltd. Boca Raton, Florida.
- Flores, A. A., & Goff, H. D. (1999). Ice Crystal Size Distributions in Dynamically Frozen Model Solutions and Ice Cream as Affected by Stabilizers. *Journal of Dairy Science*, 82(7), 1399–1407. doi:10.3168/jds.S0022-0302(99)75366-X
- Foegeding, E. A., & Davis, J. P. (2011). Food protein functionality: A comprehensive approach. *Food Hydrocolloids*, 25(8), 1853–1864. doi:10.1016/j.foodhyd.2011.05.008
- Fruhner, H., Wantke, K., & Lunkenheimer, K. (2000). Relationship between surface dilational properties and foam stability, 162(1999), 193–202.

- 
- Glicksman, M. (1982). *Food hydrocolloids : vol. 1*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Goff, H. D. (1997a). Colloidal aspects of ice cream—A review. *International Dairy Journal*, 7(6–7), 363–373. doi:10.1016/S0958-6946(97)00040-X
- Goff, H. D. (1997b). Instability and Partial Coalescence in Whippable Dairy Emulsions. *Journal of Dairy Science*, 80(10), 2620–2630. doi:10.3168/jds.S0022-0302(97)76219-2
- Goff, H. D. (2002). Formation and stabilisation of structure in ice-cream and related products. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 7(5–6), 432–437. doi:10.1016/S1359-0294(02)00076-6
- Goff, H. D. (2008). 65 Years of ice cream science. *International Dairy Journal*, 18(7), 754–758. doi:10.1016/j.idairyj.2008.03.006
- Goff, H. D. (2009). Suggested Mixes. Retrieved March 10, 2014, from <https://www.uoguelph.ca/foodscience/dairy-science-and-technology/dairy-products/ice-cream/ice-cream-formulations/suggested-mixes>
- Goff, H. D. (2011a). Ice Cream and Desserts | Ice Cream and Frozen Desserts: Manufacture. In E.-C. J. W. Fuquay (Ed.), *Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition)* (Second Edi., pp. 899–904). San Diego: Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-374407-4.00245-4
- Goff, H. D. (2011b). ICE CREAM AND DESSERTS | Ice Cream and Frozen Desserts: Product Types. In E.-C. J. W. Fuquay (Ed.), *Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition)* (Second Edi., pp. 893–898). San Diego: Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-374407-4.00244-2
- Goff, H. D., & Davidson, V. J. (1992). Flow characteristics and holding time calculations of ice-cream mixes in htst holding tubes. *Journal of Food Protection*, 55(1), 34–37.
- Goff, H. D., Davidson, V. J., & Cappi, E. (1994). Viscosity of Ice Cream Mix at Pasteurization Temperatures. *Journal of Dairy Science*, 77(8), 2207–2213. doi:10.3168/jds.S0022-0302(94)77163-0
- Goff, H. D., Ferdinando, D., & Schorsch, C. (1999). Fluorescence microscopy to study galactomannan structure in frozen sucrose and milk protein solutions. *Food Hydrocolloids*, 13(4), 353–362. doi:10.1016/S0268-005X(99)00017-X
-

- 
- Goff, H. D., & Hartel, R. W. (2013). *Ice Cream*. Springer. Retrieved from <http://books.google.com.mx/books?id=AWJDAAAQBAJ>
- Goff, H. D., Verespej, E., & Smith, A. K. (1999). A study of fat and air structures in ice cream. *International Dairy Journal*, 9(11), 817–829. doi:10.1016/S0958-6946(99)00149-1
- Gogate, P. R. (2008). Cavitation reactors for process intensification of chemical processing applications: A critical review. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47, 515–527. doi:10.1016/j.cep.2007.09.014
- Gogate, P. R., Pandit, A. B., Wilhelm, A., Ratsimba, B., & Delmas, H. (2006). Destruction of formic acid using high frequency cup horn reactor. *Water Research*, 40, 1697–1705. doi:10.1016/j.watres.2006.02.011
- Guichard, E. (2002). Interactions between flavor compounds and food ingredients and their influence on flavor perception. *Food Reviews International*, 18(1), 49–70. doi:10.1081/FRI-120003417
- Hagiwara, T., & Hartel, R. W. (1996). Effect of Sweetener, Stabilizer, and Storage Temperature on Ice Recrystallization in Ice Cream. *Journal of Dairy Science*, 79(5), 735–744. doi:10.3168/jds.S0022-0302(96)76420-2
- Hagiwara, T., Hartel, R. W., & Matsukawa, S. (2006). Relationship between Recrystallization Rate of Ice Crystals in Sugar Solutions and Water Mobility in Freeze-Concentrated Matrix. *Food Biophysics*, 1(2), 74–82. doi:10.1007/s11483-006-9009-0
- Hallez, L., Touyeras, F., Hihn, J. Y., & Klima, J. (2007). Energetic balance in an ultrasonic reactor using focused or flat high frequency transducers. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14, 739–749. doi:10.1016/j.ultsonch.2006.12.012
- Hartel, R. W. (2010). Ice Crystallization in Ice Cream Production. *Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety*, 9(2), 213–222.
- Hayes, M. G., Fox, P. F., & Kelly, A. L. (2005). Potential applications of high pressure homogenisation in processing of liquid milk. *Journal of Dairy Research*, 72, 25–33.

- 
- Hartel, R. W., Muse, M., Sofjan, R., & Tharp, B. (2004). Effects of structural attributes on hardness and melting rate of ice cream. In *Ice cream II. Proceedings of the Second IDF International Symposium on Ice Cream, Thessaloniki, Greece, 14-16 May 2003*. (pp. 124-139). International Dairy Federation.
- Hayes, M. G., & Kelly, A. L. (2003). High pressure homogenisation of raw whole bovine milk (a) effects on fat globule size and other properties. *Journal of Dairy Research*, 70(03), 297–305. Retrieved from href="http://dx.doi.org/10.1017/S0022029903006320
- HORIBA. (2012). A Guidebook to Particle Size Analysis.[online] Available at: [http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA\\_PS\\_A\\_Guidebook.pdf](http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA_PS_A_Guidebook.pdf) [Accessed: 14 Nov 2012].
- Huppertz, T., Smiddy, M. a., Goff, H. D., & Kelly, A. L. (2011). Effects of high pressure treatment of mix on ice cream manufacture. *International Dairy Journal*, 21(9), 718–726. doi:10.1016/j.idairyj.2010.12.005
- IDFA. (2015). Ice cream labeling. Retrieved from <http://www.idfa.org/news-views/media-kits/ice-cream/ice-cream-labeling>
- Igoe, R. S. (2011). *Dictionary of Food Ingredients*. Vasa (5th ed., p. 263). Springer. Retrieved from <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
- Iida, Y., Tuziuti, T., Yasui, K., Towata, A., & Kozuka, T. (2008). Control of viscosity in starch and polysaccharide solutions with ultrasound after gelatinization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(2), 140–146. doi:10.1016/j.ifset.2007.03.029
- Innocente, N., Biasutti, M., Venir, E., Spaziani, M., & Marchesini, G. (2009). Effect of high-pressure homogenization on droplet size distribution and rheological properties of ice cream mixes. *Journal of Dairy Science*, 92(5), 1864–75. doi:10.3168/jds.2008-1797
- Inoue, K., Ochi, H., Taketsuka, M., Saito, H., Sakurai, K., Ichihashi, N., ... Kokubo, S. (2008). Modeling of the effect of freezer conditions on the principal constituent parameters of ice cream by using response surface methodology. *Journal of Dairy Science*, 91(5), 1722–32. doi:10.3168/jds.2007-0796

- 
- Jambrak, a. R., Mason, T. J., Lelas, V., Herceg, Z., & Herceg, I. L. (2008). Effect of ultrasound treatment on solubility and foaming properties of whey protein suspensions. *Journal of Food Engineering*, 86, 281–287. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.10.004
- Jambrak, A. R., Mason, T. J., Lelas, V., Paniwnyk, L., & Herceg, Z. (2014). Effect of ultrasound treatment on particle size and molecular weight of whey proteins. *Journal of Food Engineering*, 121, 15–23. doi:10.1016/j.jfoodeng.2013.08.012
- Kaltsa, O., Michon, C., Yanniotis, S., & Mandala, I. (2013). Ultrasonic energy input influence on the production of sub-micron o/w emulsions containing whey protein and common stabilizers. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(3), 881–91. doi:10.1016/j.ultsonch.2012.11.011
- Kaya, S., & Tekin, A. R. (2001). The effect of salep content on the rheological characteristics of a typical ice-cream mix, 47, 59–62.
- Kentish, S. E., & Ashokkumar, M. (2011). The Physical and Chemical Effects of Ultrasound. In H. Feng, G. Barbosa-Canovas, & J. Weiss (Eds.), *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing SE - 1* (pp. 1–12). Springer New York. doi:10.1007/978-1-4419-7472-3\_1
- Kilara, A., & Chandan, R. C. (2008). Ice Cream and Frozen Desserts. In *Dairy Processing & Quality Assurance* (pp. 357–386). Wiley-Blackwell. doi:10.1002/9780813804033.ch16
- Knorr, D., Froehling, a, Jaeger, H., Reineke, K., Schlueter, O., & Schoessler, K. (2011). Emerging technologies in food processing. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2, 203–35. doi:10.1146/annurev.food.102308.124129
- Koh, L. L. a., Nguyen, H. T. H., Chandrapala, J., Zisu, B., Ashokkumar, M., & Kentish, S. E. (2014). The use of ultrasonic feed pre-treatment to reduce membrane fouling in whey ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*, 453, 230–239. doi:10.1016/j.memsci.2013.11.006
- Kouassi, K., Jouppila, K., & Roos, Y. H. (2002). Effects of  $\kappa$ -Carrageenan on Crystallization and Invertase Activity in Lactose-Sucrose Systems. *Journal of Food Science*, 67(6), 2190–2195. doi:10.1111/j.1365-2621.2002.tb09525.x
- Koxholt, M. M. R., Eisenmann, B., & Hinrichs, J. (2001). Effect of the Fat Globule Sizes on the Meltdown of Ice Cream. *Journal of Dairy Science*, 84(1), 31–37. doi:10.3168/jds.S0022-0302(01)74448-7
-

- 
- Kus, S., Altan, A., & Kaya, A. (2005). Rheological Behavior and Time-Dependent Characterization of Ice Cream Mix With Different Salep Content. *Journal of Texture Studies*, 36(3), 273–288. doi:10.1111/j.1745-4603.2005.00016.x
- Lam, R. S. H., & Nickerson, M. T. (2013). Food proteins: a review on their emulsifying properties using a structure-function approach. *Food Chemistry*, 141(2), 975–84. doi:10.1016/j.foodchem.2013.04.038
- Langendorff, V., Cuvelier, G., Michon, C., Launay, B., Parker, A., & De, C. G. (2000). Effects of carrageenan type on the behaviour of carrageenan / milk mixtures, 14, 273–280.
- Lee, H. S., & van Hout, D. (2009). Quantification of sensory and food quality: the R-index analysis. *Journal of Food Science*, 74(6), R57–64. doi:10.1111/j.1750-3841.2009.01204.x
- Lee, H. S., van Hout, D., & O'Mahony, M. (2007). Sensory difference tests for margarine: A comparison of R-Indices derived from ranking and A-Not A methods considering response bias and cognitive strategies. *Food Quality and Preference*, 18(4), 675–680. doi:10.1016/j.foodqual.2006.10.003
- Lee, H., Zhou, B., Liang, W., Feng, H., & Martin, S. E. (2009). Inactivation of *Escherichia coli* cells with sonication, manosonication, thermosonication, and manothermosonication: Microbial responses and kinetics modeling. *Journal of Food Engineering*, 93(3), 354–364. doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.01.037
- Lee, K., Jung, M., & Kim, S. (1998). Effects of Ascorbic Acid on the Light-Induced Riboflavin Degradation and Color Changes in Milks. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(97), 407–410. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10554254>
- Lewis, M., & Heppell, N. (2000). *Continuous thermal processing of foods: Pasteurization and UHT sterilization*. Gaithersburg: Aspen Publisher.
- Liu, Z., Juliano, P., Williams, R. P. W., Niere, J., & Augustin, M. A. (2014). Ultrasound effects on the assembly of casein micelles in reconstituted skim milk. *The Journal of Dairy Research*, 81(2), 146–155. doi:10.1017/S0022029913000721
- Lopez-Malo, A., Guerrero, S., Alzamora, S.M., 1999. *Saccharomyces cerevisiae*, thermal inactivation kinetics combined with ultrasound. *Journal of Food Protection* 62 (10), 1215–1217
-

- 
- Lucas, T., Wagener, M., Barey, P., & Mariette, F. (2005). NMR assessment of mix and ice cream. Effect of formulation on liquid water and ice. *International Dairy Journal*, 15(10), 1064–1073. doi:10.1016/j.idairyj.2004.06.011
- Marcotte, M., Taherian Hoshahili, A. R., & Ramaswamy, H. S. (2001). Rheological properties of selected hydrocolloids as a function of concentration and temperature. *Food Research International*, 34(8), 695–703. doi:10.1016/S0963-9969(01)00091-6
- Margulis, I. M., & Margulis, M. a. (2005). Measurement of acoustic power in studying cavitation processes. *Acoustical Physics*, 51(6), 695–704. doi:10.1134/1.2130901
- Margulis, M. A., & Margulis, I. M. (2003). Calorimetric method for measurement of acoustic power absorbed in a volume of a liquid. *Ultrasonics Sonochemistry*, 10(6), 343–5. doi:10.1016/S1350-4177(03)00100-7
- Marinova, K. G., Basheva, E. S., Nenova, B., Temelska, M., Mirarefi, A. Y., Campbell, B., & Ivanov, I. B. (2009). Physico-chemical factors controlling the foamability and foam stability of milk proteins: Sodium caseinate and whey protein concentrates. *Food Hydrocolloids*, 23(7), 1864–1876. doi:10.1016/j.foodhyd.2009.03.003
- Marshall, R. T. (2003a). ICE CREAM | Methods of Manufacture. In E.-C. B. Caballero (Ed.), *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition) (Second Edi., pp. 3221–3227)*. Oxford: Academic Press. doi:10.1016/B0-12-227055-X/00619-2
- Marshall, R. T. (2003b). ICE CREAM | Properties and Analysis. In E.-C. B. Caballero (Ed.), *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition) (Second Edi., pp. 3227–3233)*. Oxford: Academic Press. doi:10.1016/B0-12-227055-X/00620-9
- Marshall, R. T., Goff, H. D., & Hartel, R. W. (2003). *Ice Cream*. Kluwer Academic/Plenum Publishers. Retrieved from <http://books.google.com.mx/books?id=DN9Ju6oiSWkC>
- Mason, T. (1998). Power ultrasound in food processing-The way forward. In J. W. Povey & T. Mason (Eds.), *Ultrasound in food processing (pp. 105–126)*. London: Blackie Academic and Professional.

- 
- Mason, T., Paniwnyk, L., & Lorimer, J. (1996). The uses of ultrasound in food technology. *Ultrasonics Sonochemistry*, 3. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135041779600034X>
- Mason, T., Riera, E., Vercet, A., & Lopez-Buesa, P. (2005). Application of ultrasound. In D.-W. Sun (Ed.), *Emerging technologies for food processing* (pp. 323–350). California: Elsevier Academic Press.
- McClements, D. J. (2004). Protein-stabilized emulsions. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 9(5), 305–313. doi:10.1016/j.cocis.2004.09.003
- Méndez-Velasco, C., & Goff, H. D. (2011). Enhancement of fat colloidal interactions for the preparation of ice cream high in unsaturated fat. *International Dairy Journal*, 21(8), 540–547. doi:10.1016/j.idairyj.2011.03.008
- Miller-Livney, T., & Hartel, R. W. (1997). Ice Recrystallization in Ice Cream: Interactions Between Sweeteners and Stabilizers. *Journal of Dairy Science*, 80(3), 447–456. doi:10.3168/jds.S0022-0302(97)75956-3
- Minhas, K. S., Sidhu, J. S., & Mudahar, G. S. (2002). Flow behavior characteristics of ice cream mix made with buffalo milk and various stabilizers, 25–40.
- Murray, B. S. (2007). Stabilization of bubbles and foams. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 12(4-5), 232–241. doi:10.1016/j.cocis.2007.07.009
- Muse, M. R., & Hartel, R. W. (2004). Ice cream structural elements that affect melting rate and hardness. *Journal of Dairy Science*, 87(1), 1–10. doi:10.3168/jds.S0022-0302(04)73135-5
- Norton, J. E., & Norton, I. T. (2010). Designer colloids-towards healthy everyday foods? *Soft Matter*, 6(16), 3735–3742. doi:10.1039/C001018A
- NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-036-SSA1-1993, BIENES Y SERVICIOS. HELADOS DE CREMA, DE LECHE O GRASA VEGETAL, SORBETES Y BASES O MEZCLAS PARA HELADOS. ESPECIFICACIONES SANITARIAS.

- 
- O'Sullivan, J., Arellano, M., Pichot, R., & Norton, I. (2014). The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of dairy proteins. *Food Hydrocolloids*, 1–11. doi:10.1016/j.foodhyd.2014.05.011
- Ordoñez, J.A., Aguilera, M.A., Garcia, M.L., Sanz, B., 1987. Effect of combined ultrasonic and heat treatment (thermoultrasonication) on the survival of a strain of *Staphylococcus aureus*. *Journal of Dairy Research* 54 (1), 61–67.
- Patist, A., & Bates, D. (2008). Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9, 147–154. doi:10.1016/j.ifset.2007.07.004
- Patmore, J. ., Goff, H. D., & Fernandes, S. (2003). Cryo-gelation of galactomannans in ice cream model systems. *Food Hydrocolloids*, 17(2), 161–169. doi:10.1016/S0268-005X(02)00048-6
- Pedrero, D. L., & Pangborn, R. M. (1989). *Evaluación Sensorial de los Alimentos: Métodos Análíticos*. España: Alahambra S.A.
- Pereda, J., Ferragut, V., Quevedo, J. M., Guamis, B., & Trujillo, a J. (2007). Effects of ultra-high pressure homogenization on microbial and physicochemical shelf life of milk. *Journal of Dairy Science*, 90(3), 1081–93. doi:10.3168/jds.S0022-0302(07)71595-3
- Phillips, G. O., & Williams, P. A. (1995). Interaction of hydrocolloids in food systems. In A. . Gaonkar (Ed.), *Ingredient Interactions*1 (pp. 131–169). New York: Marcel Dekker.
- Phillips, L. G., Mcgiff, M. Lou, Barbano, D. M., & Lawless, H. T. (1995). The Influence of Fat on the Sensory Properties, Viscosity, and Color of Lowfat Milk. *Journal of Dairy Science*, 78(6), 1258–1266. doi:10.3168/jds.S0022-0302(95)76746-7
- Pingret, D., Fabiano-Tixier, A.-S., & Chemat, F. (2013). Degradation during application of ultrasound in food processing: A review. *Food Control*, 31(2), 593–606. doi:10.1016/j.foodcont.2012.11.039
- Pingret, D., Fabiano-Tixier, A.-S., Petitcolas, E., Canselier, J.-P., & Chemat, F. (2011). First investigation on ultrasound-assisted preparation of food products: sensory and physicochemical characteristics. *Journal of Food Science*, 76(2), C287–92. doi:10.1111/j.1750-3841.2010.02019.x
-

---

Preininger, M. (2006). Interactions of Flavor Compounds in Foods. In A. G. Gaonkar & A. McPherson (Eds.), *Ingredient interactions effect on food quality* (2nd ed., pp. 476–542). Boca Raton, Florida: Taylor & Francis.

PROY-NMX-F-714-COFOCALEC-2012 SISTEMA PRODUCTO LECHE – ALIMENTOS – HELADOS Y NIEVES O SORBETES – DENOMINACIONES, ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA.

Regand, A., & Goff, H. D. (2002). Effect of biopolymers on structure and ice recrystallization in dynamically frozen ice cream model systems. *Journal of Dairy Science*, 85(11), 2722–32. doi:10.3168/jds.S0022-0302(02)74359-2

Regand, A., & Goff, H. D. (2003). Structure and ice recrystallization in frozen stabilized ice cream model systems, 17, 95–102.

Rezaei, R., Khomeiri, M., Kashaninejad, M., & Aalami, M. (2011). Effects of guar gum and arabic gum on the physicochemical, sensory and flow behaviour characteristics of frozen yoghurt. *International Journal of Dairy Technology*, 64(4), 563–568. doi:10.1111/j.1471-0307.2011.00705.x

Riener, J., Noci, F., Cronin, D. a., Morgan, D. J., & Lyng, J. G. (2009a). Characterisation of volatile compounds generated in milk by high intensity ultrasound. *International Dairy Journal*, 19(4), 269–272. doi:10.1016/j.idairyj.2008.10.017

Riener, J., Noci, F., Cronin, D. a., Morgan, D. J., & Lyng, J. G. (2009b). The effect of thermosonication of milk on selected physicochemical and microstructural properties of yoghurt gels during fermentation. *Food Chemistry*, 114(3), 905–911. doi:10.1016/j.foodchem.2008.10.037

Roach, A., & Harte, F. (2008). Disruption and sedimentation of casein micelles and casein micelle isolates under high-pressure homogenization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(1), 1–8. doi:10.1016/j.ifset.2007.03.027

Rodríguez-Patino, J. M., Carrera Sánchez, C., & Rodríguez-Niño, M. R. (2008). Implications of interfacial characteristics of food foaming agents in foam formulations. *Advances in Colloid and Interface Science*, 140(2), 95–113. doi:10.1016/j.cis.2007.12.007

- 
- Roland, A. M., Phillips, L. G., & Boor, K. J. (1999). Effects of Fat Content on the Sensory Properties, Melting, Color, and Hardness of Ice Cream. *Journal of Dairy Science*, 82(1), 32–38. doi:10.3168/jds.S0022-0302(99)75205-7
- Sandra, S., & Dalgleish, D. G. (2005). Effects of ultra-high-pressure homogenization and heating on structural properties of casein micelles in reconstituted skim milk powder. *International Dairy Journal*, 15(11), 1095–1104. doi:10.1016/j.idairyj.2004.11.015
- Saxby, M. J. (1996). *Food taints and off-flavours*. Springer.
- Schneider, Y., Zahn, S., Hofmann, J., Wecks, M., & Rohm, H. (2006). Acoustic cavitation induced by ultrasonic cutting devices: a preliminary study. *Ultrasonics Sonochemistry*, 13(2), 117–20. doi:10.1016/j.ultsonch.2005.09.002
- Schorsch, C., Jones, M. G., & Norton, I. T. (2000). Thermodynamic incompatibility and microstructure of milk protein / locust bean gum / sucrose systems, 13(1999), 89–99.
- Shanmugam, A., Chandrapala, J., & Ashokkumar, M. (2012). The effect of ultrasound on the physical and functional properties of skim milk. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 16(0), 251–258. doi:10.1016/j.ifset.2012.06.005
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2009). *Introduction to Food Engineering* (4th ed.). London: Elsevier.
- Skarra, L. (2006). Using gums in “clean label” formulations. *Prepared Foods*, 10(175), 61–68.
- Sofjan, R. P., & Hartel, R. W. (2004). Effects of overrun on structural and physical characteristics of ice cream. *International Dairy Journal*, 14(3), 255–262. doi:10.1016/j.idairyj.2003.08.005
- Sopade, P. A., & Kassum, A. L. (1992). Rheological characterization of akamu, a semi-liquid food made from maize, millet and sorghum. *Journal of Cereal Science*, 15(2), 193–202. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0733-5210(09)80071-4
- Soria, A. C., & Villamiel, M. (2010). Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 21(7), 323–331. doi:10.1016/j.tifs.2010.04.003

- 
- Soukoulis, C., Chandrinou, I., & Tzia, C. (2008). Study of the functionality of selected hydrocolloids and their blends with  $\kappa$ -carrageenan on storage quality of vanilla ice cream. *LWT - Food Science and Technology*, 41(10), 1816–1827. doi:10.1016/j.lwt.2007.12.009
- Spagnuolo, P., Dalgleish, D. G., Goff, H. D., & Morris, E. (2005). Kappa-carrageenan interactions in systems containing casein micelles and polysaccharide stabilizers. *Food Hydrocolloids*, 19(3), 371–377. doi:10.1016/j.foodhyd.2004.10.003
- Spreer, E. (1998). *Milk and Dairy Product Technology*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Sutkar, V. S., & Gogate, P. R. (2009). Design aspects of sonochemical reactors: Techniques for understanding cavitation activity distribution and effect of operating parameters. *Chemical Engineering Journal*, 155(1-2), 26–36. doi:10.1016/j.cej.2009.07.021
- Syrbe, A., Bauer, W. J., & Klostermeyer, H. (1998). Polymer Science Concepts in Dairy Systems—an Overview of Milk Protein and Food Hydrocolloid Interaction. *International Dairy Journal*, 8(3), 179–193. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0958-6946(98)00041-7
- Tait, M. J., Finney, D. J., & Narhan, S. K. (2003). ICE CREAM | Dietary Importance. In E.-C. B. Caballero (Ed.), *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition)* (Second Ed., pp. 3233–3236). Oxford: Academic Press. doi:10.1016/B0-12-227055-X/00621-0
- Thaiudom, S., & Goff, H. D. (2003). Effect of  $\kappa$ -carrageenan on milk protein polysaccharide mixtures. *International Dairy Journal*, 13(9), 763–771. doi:10.1016/S0958-6946(03)00097-9
- Toepfl, S., Mathys, A., Heinz, V., & Knorr, D. (2006). Review: Potential of High Hydrostatic Pressure and Pulsed Electric Fields for Energy Efficient and Environmentally Friendly Food Processing. *Food Reviews International*, 22(4), 405–423. doi:10.1080/87559120600865164
- Varela, P., & Fiszman, S. M. (2013). Exploring consumers' knowledge and perceptions of hydrocolloids used as food additives and ingredients. *Food Hydrocolloids*, 30(1), 477–484. doi:10.1016/j.foodhyd.2012.07.001
- Vega, C., & Goff, H. D. (2005). Phase separation in soft-serve ice cream mixes: rheology and microstructure. *International Dairy Journal*, 15(3), 249–254. doi:10.1016/j.idairyj.2004.07.007

- 
- Vijayakumar, S. (2012). Effects of thermosonication on proteases and characteristics of milk and cream. Iowa State University.
- Villamiel, M., & de Jong, P. (2000). Influence of high-intensity ultrasound and heat treatment in continuous flow on fat, proteins, and native enzymes of milk. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(7), 3068. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10898666>
- Wilde, P., Mackie, A., Husband, F., Gunning, P., & Morris, V. (2004). Proteins and emulsifiers at liquid interfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 108-109, 63-71. doi:10.1016/j.cis.2003.10.011
- Williams, A., & Dickinson, E. (1995). Shear-Induced Instability of Oil-in-Water Emulsions. In *Food Macromolecules and Colloids* (pp. 252-255). The Royal Society of Chemistry. doi:10.1039/9781847550873-00252
- Wu, H., U, G. J. H., & Mount, J. R. (2001). Effects of ultrasound on milk homogenization and fermentation with yogurt starter, 211-218.
- Yanjun, S., Jianhang, C., Shuwen, Z., Hongjuan, L., Jing, L., Lu, L., ... Jiaping, L. (2014). Effect of power ultrasound pre-treatment on the physical and functional properties of reconstituted milk protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, 124, 11-18. doi:10.1016/j.jfoodeng.2013.09.013
- Young, F. R. (1999). *Cavitation*. Imperial College Press. Retrieved from <http://books.google.com.mx/books?id=CUTOzTffZDQC>
- Zhao, L., Zhao, G., Chen, F., Wang, Z., Wu, J., & Hu, X. (2006). Different Effects of Microwave and Ultrasound on the Stability of ( all-E ) -Astaxanthin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(21), 8346-8351.
- Zimmermann-Stein, K. (2011). Efecto de la homogenización de leche a alta presión sobre las características de un helado duro. Universidad de las Américas Puebla.
- Zisu, B., Schleyer, M., & Chandrapala, J. (2013). Application of ultrasound to reduce viscosity and control the rate of age thickening of concentrated skim milk. *International Dairy Journal*, 31(1), 41-43. doi:10.1016/j.idairyj.2012.04.007

## VIII. APÉNDICES.

### Apéndice A. Tablas.

#### A.1 Efecto de la termosonicación en los parámetros reológicos de la mezcla para helado.<sup>1</sup>

Tratamiento	$\eta_{50}$	k	n	R <sup>2</sup>
<b>Control</b>	140.03 ± 4.95	435.35 ± 13.89	0.71 ± 0.0028	0.9971 ± 0.0014
<b>Control</b>	134.45 ± 6.43	413.53 ± 20.06	0.71 ± 0.0023	0.9991 ± 0.0138
<b>186/24/20</b>	76.64 ± 1.98	179.21 ± 15.88	0.78 ± 0.0228	0.9951 ± 0.0013
<b>186/24/80</b>	165.88 ± 2.12	619.17 ± 14.48	0.66 ± 0.0034	0.9950 ± 0.0007
<b>186/36/20</b>	153.39 ± 7.78	545.29 ± 53.53	0.68 ± 0.0086	0.9983 ± 0.0047
<b>186/36/80</b>	419.67 ± 1.41	1609.23 ± 19.51	0.66 ± 0.0046	0.9973 ± 0.0293
<b>345/24/20</b>	66.83 ± 2.62	132.92 ± 8.69	0.82 ± 0.0126	0.9910 ± 0.0026
<b>345/24/80</b>	88.40 ± 1.84	235.84 ± 1.99	0.75 ± 0.0025	0.9993 ± 0.0205
<b>345/36/20</b>	74.11 ± 1.41	166.35 ± 16.89	0.79 ± 0.0256	0.9971 ± 0.0008
<b>345/36/80</b>	151.92 ± 2.12	585.59 ± 39.47	0.66 ± 0.0147	0.9956 ± 0.0001
<b>132/30/50</b>	954.66 ± 17.68	5956.06 ± 208.64	0.53 ± 0.0053	0.9978 ± 0.0013
<b>400/30/50</b>	368.25 ± 7.07	1447.67 ± 144.89	0.65 ± 0.0138	0.9966 ± 0.0010
<b>266/20/50</b>	762.90 ± 2.83	4908.96 ± 330.04	0.52 ± 0.0086	0.9993 ± 0.0032
<b>266/40/50</b>	729.69 ± 2.83	4634.96 ± 76.11	0.53 ± 0.0034	0.9932 ± 0.0128
<b>266/30/0</b>	93.12 ± 4.24	226.14 ± 37.48	0.77 ± 0.0348	0.9928 ± 0.0015
<b>266/30/100</b>	273.65 ± 4.24	930.73 ± 18.93	0.69 ± 0.0007	0.9981 ± 0.0010
<b>266/30/50</b>	753.79 ± 18.38	5204.29 ± 126.69	0.51 ± 0.0014	0.9972 ± 0.0014
<b>186/24/20</b>	74.37 ± 2.18	151.14 ± 25.81	0.82 ± 0.0178	0.9756 ± 0.0138
<b>186/24/80</b>	162.85 ± 1.91	596.41 ± 12.87	0.67 ± 0.0021	0.9968 ± 0.0013
<b>186/36/20</b>	142.52 ± 4.67	487.05 ± 49.42	0.69 ± 0.0078	0.9974 ± 0.0007
<b>186/36/80</b>	417.02 ± 1.13	1639.89 ± 21.68	0.65 ± 0.0059	0.9905 ± 0.0047
<b>345/24/20</b>	63.52 ± 2.88	112.44 ± 13.03	0.85 ± 0.0253	0.9496 ± 0.0293
<b>345/24/80</b>	85.56 ± 1.47	231.16 ± 4.30	0.75 ± 0.0016	0.9956 ± 0.0026
<b>345/36/20</b>	73.13 ± 0.85	142.47 ± 21.95	0.83 ± 0.0281	0.9681 ± 0.0205
<b>345/36/80</b>	149.42 ± 2.33	534.84 ± 28.71	0.67 ± 0.0120	0.9967 ± 0.0008
<b>132/30/50</b>	921.96 ± 12.37	5587.22 ± 234.73	0.54 ± 0.0037	0.9978 ± 0.0001
<b>400/30/50</b>	388.50 ± 5.66	1703.79 ± 217.33	0.62 ± 0.0119	0.9984 ± 0.0013
<b>266/20/50</b>	745.57 ± 3.11	4549.93 ± 152.32	0.54 ± 0.0086	0.9979 ± 0.0010
<b>266/40/50</b>	739.96 ± 1.70	4788.72 ± 141.34	0.52 ± 0.0044	0.9977 ± 0.0032
<b>266/30/0</b>	88.30 ± 2.97	173.14 ± 22.49	0.83 ± 0.0309	0.9747 ± 0.0128
<b>266/30/100</b>	267.91 ± 4.67	906.39 ± 20.65	0.69 ± 0.0011	0.996 ± 0.0015
<b>266/30/50</b>	729.90 ± 14.71	5005.21 ± 112.61	0.51 ± 0.0007	0.9959 ± 0.0010

<sup>1</sup> Promedio de duplicados.

A.2. Parámetros de color de las mezclas termosónicas para helado duro.<sup>1</sup>

Tratamiento	L*	a*	b*	ΔE
Control	78.34 ± 0.38	-4.47 ± 0.15	4.72 ± 0.07	-
Control	78.94 ± 0.42	-4.67 ± 0.16	4.84 ± 0.10	-
186/24/20	82.62 ± 0.30	-3.81 ± 0.06	6.49 ± 0.19	4.40 ± 0.38
186/24/80	82.21 ± 0.01	-4.43 ± 0.27	6.83 ± 0.20	4.12 ± 0.19
186/36/20	83.96 ± 0.11	-3.77 ± 0.21	6.69 ± 0.47	5.70 ± 0.83
186/36/80	81.80 ± 0.08	-3.77 ± 0.03	6.20 ± 0.05	3.55 ± 0.06
345/24/20	82.71 ± 0.81	-3.87 ± 0.02	5.96 ± 0.78	4.29 ± 0.59
345/24/80	80.95 ± 0.91	-3.85 ± 0.24	5.48 ± 0.77	2.52 ± 0.43
345/36/20	81.27 ± 0.91	-4.55 ± 0.48	6.43 ± 0.35	3.10 ± 0.37
345/36/80	81.62 ± 0.13	-4.34 ± 0.42	6.49 ± 0.39	3.44 ± 0.02
132/30/50	82.33 ± 0.42	-3.95 ± 0.46	6.11 ± 0.55	3.96 ± 0.37
400/30/50	82.60 ± 0.07	-3.82 ± 0.64	6.52 ± 0.29	4.38 ± 0.99
266/20/50	81.36 ± 0.63	-4.01 ± 0.18	5.86 ± 0.47	2.98 ± 0.90
266/40/50	83.46 ± 0.93	-4.56 ± 0.11	6.83 ± 0.50	5.24 ± 0.88
266/30/0	82.98 ± 0.37	-4.59 ± 0.08	6.37 ± 0.28	4.61 ± 0.66
266/30/100	83.27 ± 0.04	-4.63 ± 0.07	7.27 ± 0.15	5.26 ± 1.01
266/30/50	81.28 ± 0.42	-4.51 ± 0.50	5.63 ± 0.20	2.78 ± 0.46
186/24/20	82.95 ± 0.19	-3.89 ± 0.03	6.82 ± 0.19	4.81 ± 0.24
186/24/80	82.19 ± 0.12	-3.79 ± 0.36	7.23 ± 0.17	4.38 ± 0.17
186/36/20	85.38 ± 0.81	-4.08 ± 0.26	6.09 ± 0.55	6.88 ± 0.83
186/36/80	81.63 ± 0.13	-3.71 ± 0.03	6.28 ± 0.06	3.45 ± 0.04
345/24/20	81.44 ± 0.63	-3.83 ± 0.04	4.96 ± 0.85	2.90 ± 0.79
345/24/80	79.52 ± 0.03	-4.11 ± 0.16	6.47 ± 0.56	1.96 ± 0.39
345/36/20	82.70 ± 0.11	-3.81 ± 0.58	6.97 ± 0.35	4.68 ± 0.45
345/36/80	81.85 ± 0.2	-3.88 ± 0.19	5.70 ± 0.39	3.41 ± 0.03
132/30/50	82.79 ± 0.36	-4.60 ± 0.46	6.82 ± 0.45	4.62 ± 0.46
400/30/50	81.23 ± 0.58	-4.52 ± 0.54	5.93 ± 0.50	2.83 ± 0.66
266/20/50	79.27 ± 0.89	-3.81 ± 0.10	6.53 ± 0.62	2.00 ± 0.83
266/40/50	82.00 ± 0.73	-4.41 ± 0.14	6.28 ± 0.35	3.68 ± 0.21
266/30/0	82.33 ± 0.59	-4.44 ± 0.14	6.04 ± 0.28	3.90 ± 0.66
266/30/100	80.87 ± 0.70	-4.54 ± 0.06	7.09 ± 0.14	3.21 ± 0.65
266/30/50	81.82 ± 0.23	-3.87 ± 0.5	5.17 ± 0.30	3.28 ± 0.25

<sup>1</sup> Promedio de triplicados.

A.3. Distribución de tamaño de partícula de las mezclas termosonicadas para helado duro.<sup>1</sup>

<b>Tratamiento</b>	<b>D<sub>32</sub></b>	<b>D<sub>10</sub></b>	<b>D<sub>50</sub></b>	<b>D<sub>90</sub></b>
<b>Control</b>	4.43 ± 0.17	0.28 ± 0.02	2.38 ± 0.54	4.65 ± 0.04
<b>Control</b>	4.63 ± 0.14	0.31 ± 0.03	3.02 ± 0.41	4.72 ± 0.06
<b>186/24/20</b>	4.99 ± 0.11	0.35 ± 0.02	1.20 ± 0.09	5.06 ± 0.10
<b>186/24/80</b>	4.57 ± 0.26	0.39 ± 0.03	3.52 ± 0.06	4.66 ± 0.22
<b>186/36/20</b>	4.56 ± 0.32	0.40 ± 0.01	2.04 ± 0.27	4.60 ± 0.46
<b>186/36/80</b>	5.13 ± 0.37	0.48 ± 0.01	3.93 ± 0.19	5.36 ± 0.23
<b>345/24/20</b>	4.14 ± 0.02	0.31 ± 0.02	1.18 ± 0.07	4.10 ± 0.04
<b>345/24/80</b>	3.58 ± 0.61	0.30 ± 0.04	1.76 ± 0.32	2.54 ± 1.40
<b>345/36/20</b>	4.73 ± 0.04	0.30 ± 0.01	1.54 ± 0.20	4.89 ± 0.14
<b>345/36/80</b>	4.30 ± 0.16	0.39 ± 0.01	3.07 ± 0.62	4.45 ± 0.30
<b>132/30/50</b>	5.10 ± 0.42	2.73 ± 0.49	4.12 ± 0.38	5.63 ± 0.33
<b>400/30/50</b>	5.33 ± 0.05	0.55 ± 0.01	4.45 ± 0.17	5.59 ± 0.02
<b>266/20/50</b>	5.00 ± 0.64	1.97 ± 0.13	3.27 ± 0.21	5.70 ± 0.70
<b>266/40/50</b>	4.83 ± 0.07	1.72 ± 0.60	2.94 ± 0.54	5.52 ± 0.01
<b>266/30/0</b>	4.78 ± 0.01	0.37 ± 0.02	1.25 ± 0.02	4.83 ± 0.01
<b>266/30/100</b>	5.44 ± 0.36	0.34 ± 0.01	1.36 ± 0.19	5.51 ± 0.10
<b>266/30/50</b>	6.09 ± 0.01	4.51 ± 0.39	5.63 ± 0.12	6.28 ± 0.04
<b>186/24/20</b>	4.77 ± 0.12	0.39 ± 0.02	1.35 ± 0.11	4.84 ± 0.14
<b>186/24/80</b>	4.90 ± 0.19	0.43 ± 0.02	3.41 ± 0.06	5.06 ± 0.34
<b>186/36/20</b>	4.00 ± 0.36	0.41 ± 0.01	2.57 ± 0.23	4.00 ± 0.34
<b>186/36/80</b>	5.61 ± 0.37	0.46 ± 0.01	4.27 ± 0.22	5.82 ± 0.33
<b>345/24/20</b>	4.17 ± 0.01	0.33 ± 0.02	1.09 ± 0.07	4.16 ± 0.03
<b>345/24/80</b>	4.35 ± 0.61	0.39 ± 0.07	1.02 ± 0.37	4.33 ± 1.02
<b>345/36/20</b>	4.65 ± 0.05	0.32 ± 0.01	1.26 ± 0.20	4.72 ± 0.10
<b>345/36/80</b>	3.92 ± 0.32	0.39 ± 0.01	2.28 ± 0.34	3.92 ± 0.30
<b>132/30/50</b>	5.77 ± 0.52	3.31 ± 0.25	5.01 ± 0.69	6.10 ± 0.30
<b>400/30/50</b>	5.25 ± 0.05	0.52 ± 0.02	4.24 ± 0.18	5.55 ± 0.03
<b>266/20/50</b>	4.18 ± 0.35	2.26 ± 0.21	2.97 ± 0.13	4.59 ± 0.86
<b>266/40/50</b>	4.97 ± 0.08	2.67 ± 0.40	3.91 ± 0.82	5.55 ± 0.01
<b>266/30/0</b>	4.79 ± 0.01	0.33 ± 0.02	1.29 ± 0.04	4.84 ± 0.01
<b>266/30/100</b>	5.01 ± 0.27	0.35 ± 0.01	1.70 ± 0.17	5.29 ± 0.16
<b>266/30/50</b>	6.09 ± 0.10	3.82 ± 0.44	5.44 ± 0.09	6.22 ± 0.04

<sup>1</sup> Promedio de duplicados.

---

**A.4. Valores obtenidos para la incorporación de aire en los helados termosonicados.**

---

<b>Tratamiento</b>	<b>Incorporación de aire (%)</b>
<b>Control</b>	20
<b>Control</b>	20
<b>186/24/20</b>	24.4444
<b>186/24/80</b>	28.8889
<b>186/36/20</b>	28.8889
<b>186/36/80</b>	26.6667
<b>345/24/20</b>	26.6667
<b>345/24/80</b>	26.6667
<b>345/36/20</b>	26.6667
<b>345/36/80</b>	26.6667
<b>132/30/50</b>	28.8889
<b>400/30/50</b>	24.4444
<b>266/20/50</b>	26.6667
<b>266/40/50</b>	28.8889
<b>266/30/0</b>	24.4444
<b>266/30/100</b>	24.4444
<b>266/30/50</b>	20.0000
<b>186/24/20</b>	22.2222
<b>186/24/80</b>	26.6667
<b>186/36/20</b>	26.6667
<b>186/36/80</b>	26.6667
<b>345/24/20</b>	24.4444
<b>345/24/80</b>	24.4444
<b>345/36/20</b>	28.8889
<b>345/36/80</b>	24.4444
<b>132/30/50</b>	26.6667
<b>400/30/50</b>	26.6667
<b>266/20/50</b>	24.4444
<b>266/40/50</b>	26.6667
<b>266/30/0</b>	24.4444
<b>266/30/100</b>	26.6667
<b>266/30/50</b>	22.2222

---

**A.5. Valores obtenidos para la firmeza en los helados termosonicados.<sup>1</sup>**

<b>Tratamiento</b>	<b>Firmeza (kg)</b>
<b>Control</b>	7.40 ± 0.14
<b>Control</b>	7.74 ± 0.25
<b>186/24/20</b>	6.85 ± 0.38
<b>186/24/80</b>	2.15 ± 0.12
<b>186/36/20</b>	4.63 ± 0.24
<b>186/36/80</b>	2.11 ± 0.12
<b>345/24/20</b>	1.75 ± 0.09
<b>345/24/80</b>	7.09 ± 0.27
<b>345/36/20</b>	7.65 ± 0.03
<b>345/36/80</b>	15.3 ± 2.72
<b>132/30/50</b>	4.59 ± 0.04
<b>400/30/50</b>	2.90 ± 0.02
<b>266/20/50</b>	7.46 ± 0.02
<b>266/40/50</b>	8.06 ± 0.17
<b>266/30/0</b>	7.34 ± 0.09
<b>266/30/100</b>	7.53 ± 0.17
<b>266/30/50</b>	8.01 ± 0.02
<b>186/24/20</b>	6.91 ± 0.01
<b>186/24/80</b>	2.45 ± 0.23
<b>186/36/20</b>	3.93 ± 0.17
<b>186/36/80</b>	2.21 ± 0.27
<b>345/24/20</b>	1.69 ± 0.15
<b>345/24/80</b>	7.83 ± 0.04
<b>345/36/20</b>	8.13 ± 0.51
<b>345/36/80</b>	16.67 ± 1.10
<b>132/30/50</b>	4.75 ± 0.12
<b>400/30/50</b>	3.14 ± 0.24
<b>266/20/50</b>	9.21 ± 0.37
<b>266/40/50</b>	7.87 ± 0.03
<b>266/30/0</b>	7.23 ± 0.19
<b>266/30/100</b>	7.13 ± 0.24
<b>266/30/50</b>	6.83 ± 0.68

<sup>1</sup> Promedio de triplicados.

**A.6. Velocidad de drenado e inicio de drenado en helados con diferentes tratamientos de TS.<sup>1</sup>**

<b>Tratamiento</b>	<b>Drenado (%/min)</b>	<b>Inicio de drenado (s)</b>
<b>Control</b>	0.87 ± 0.048	1230 ± 321
<b>Control</b>	0.78 ± 0.036	1608 ± 214
<b>186/24/20</b>	1.02 ± 0.036	1200 ± 108
<b>186/24/80</b>	1.04 ± 0.016	1223 ± 73
<b>186/36/20</b>	1.03 ± 0.008	1000 ± 141
<b>186/36/80</b>	1.04 ± 0.020	1218 ± 88
<b>345/24/20</b>	0.80 ± 0.011	1354 ± 54
<b>345/24/80</b>	0.88 ± 0.030	1120 ± 59
<b>345/36/20</b>	0.92 ± 0.036	1284 ± 30
<b>345/36/80</b>	0.83 ± 0.007	1299 ± 96
<b>132/30/50</b>	0.91 ± 0.021	1200 ± 109
<b>400/30/50</b>	0.90 ± 0.012	1253 ± 52
<b>266/20/50</b>	1.02 ± 0.010	1000 ± 28
<b>266/40/50</b>	0.94 ± 0.024	1189 ± 89
<b>266/30/0</b>	0.80 ± 0.030	1587 ± 21
<b>266/30/100</b>	1.06 ± 0.044	1144 ± 31
<b>266/30/50</b>	0.81 ± 0.033	1281 ± 86
<b>186/24/20</b>	0.98 ± 0.033	1369 ± 96
<b>186/24/80</b>	1.01 ± 0.022	1338 ± 57
<b>186/36/20</b>	1.02 ± 0.009	1222 ± 157
<b>186/36/80</b>	1.02 ± 0.012	1355 ± 58
<b>345/24/20</b>	0.79 ± 0.009	1285 ± 44
<b>345/24/80</b>	0.93 ± 0.036	1044 ± 64
<b>345/36/20</b>	0.87 ± 0.048	1355 ± 55
<b>345/36/80</b>	0.81 ± 0.007	1451 ± 96
<b>132/30/50</b>	0.87 ± 0.033	1393 ± 82
<b>400/30/50</b>	0.87 ± 0.016	1335 ± 35
<b>266/20/50</b>	1.01 ± 0.008	935 ± 37
<b>266/40/50</b>	0.92 ± 0.020	1369 ± 152
<b>266/30/0</b>	0.76 ± 0.033	1637 ± 32
<b>266/30/100</b>	1.11 ± 0.024	1095 ± 35
<b>266/30/50</b>	0.77 ± 0.024	1485 ± 144

<sup>1</sup>Promedio de duplicados.

---

## Apéndice B. Formato utilizado para la evaluación sensorial.



### Evaluación Sensorial de Helado



Nombre: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

Frente a usted hay tres muestras codificadas, pruébelas y ordénelas anotando en el recuadro el número de muestra de acuerdo a la intensidad o agrado del atributo especificado. Preste atención a la secuencia de los productos, inicie por la muestra de la izquierda y continúe hacia la derecha. Limpie su paladar al cambiar el producto que se está degustando y cada vez que lo requiera. Sea honesto en la evaluación.

	Menos Intenso		Más Intenso
<b>Olor a Vainilla</b>			
	Menos Intenso		Más Intenso
<b>Gomosidad</b>			
	Menos Intenso		Más Intenso
<b>Arenosidad</b>			
	Menos Intenso		Más Intenso
<b>Sabor Metálico</b>			
	Menos Intenso		Más Intenso
<b>Sabor a Vainilla</b>			
	Menos Agradable		Más Agradable
<b>Agrado General</b>			



¡Gracias por su participación!



---

## Apéndice C. Resultados de los análisis estadísticos

### C.1 Viscosidad

#### C.1.1. Análisis de regresión: Viscosidad vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$\text{Viscosidad} = 812 - 100 x_1 + 26.8 x_2 + 55.7 x_3 - 31.8 x_1x_2 - 32.5 x_1x_3 + 29.6 x_2x_3 - 127 x_1\text{cuad} - 96.5 x_2\text{cuad} - 296 x_3\text{cuad}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	812.3	154.2	5.27	0.000
x1	-100.42	41.97	-2.39	0.027
x2	26.79	41.97	0.64	0.531
x3	55.72	41.97	1.33	0.199
x1x2	-31.79	54.84	-0.58	0.569
x1x3	-32.55	54.84	-0.59	0.559
x2x3	29.60	54.84	0.54	0.595
x1cuad	-126.98	63.05	-2.01	0.058
x2cuad	-96.51	63.05	-1.53	0.142
x3cuad	-295.83	63.05	-4.69	0.000

S = 219.369    R-cuad. = 63.2%    R-cuad.(ajustado) = 46.6%

PRESS = 2082156    R-cuad.(pred) = 20.30%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	1649905	183323	3.81	0.006
Error residual	20	962457	48123		
Total	29	2612362			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
9	2	938.31	A
11	2	754.23	B
15	2	741.85	B
12	2	734.83	B
4	2	418.34	C
10	2	378.38	D
14	2	270.78	E
2	2	164.37	F
8	2	150.67	F
3	2	147.95	F
0	2	137.24	F
13	2	90.71	G
6	2	86.98	G
1	2	75.51	G
7	2	73.62	G
5	2	65.17	G

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

---

### C.1.2. Análisis de regresión: k vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$k = 5557 - 652 x_1 + 124 x_2 + 240 x_3 - 126 x_1x_2 - 129 x_1x_3 + 120 x_2x_3 - 1132 x_1^2 - 762 x_2^2 - 2233 x_3^2$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	5557	1026	5.42	0.000
x1	-651.7	279.2	-2.33	0.030
x2	124.2	279.2	0.44	0.661
x3	239.9	279.2	0.86	0.400
x1x2	-126.2	364.8	-0.35	0.733
x1x3	-129.3	364.8	-0.35	0.727
x2x3	120.1	364.8	0.33	0.745
x1cuad	-1131.9	419.4	-2.70	0.014
x2cuad	-761.8	419.4	-1.82	0.084
x3cuad	-2233.1	419.4	-5.32	0.000

S = 1459.39 R-cuad. = 65.9% R-cuad.(ajustado) = 50.6%

PRESS = 92091877 R-cuad.(pred) = 26.36%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	82465937	9162882	4.30	0.003
Error residual	20	42596335	2129817		
Total	29	125062272			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
9	2	5771.6	A
15	2	5104.7	B
11	2	4729.4	B
12	2	4711.8	B
4	2	1624.6	C
10	2	1575.7	C
14	2	918.6	D
2	2	607.8	D E
8	2	560.2	D E F
3	2	516.2	D E F
0	2	424.4	E F
6	2	233.5	E F
13	2	199.6	E F
1	2	165.2	E F
7	2	154.4	F
5	2	122.7	F

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

---

### C.1.3. Análisis de regresión: n vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$n = 0.486 + 0.0316 x_1 - 0.0185 x_2 - 0.0433 x_3 + 0.0027 x_1x_2 - 0.0095 x_1x_3 + 0.0065 x_2x_3 + 0.0562 x_1\text{cuad} + 0.0358 x_2\text{cuad} + 0.112 x_3\text{cuad}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	0.48650	0.04718	10.31	0.000
x1	0.03155	0.01284	2.46	0.023
x2	-0.01853	0.01284	-1.44	0.164
x3	-0.04326	0.01284	-3.37	0.003
x1x2	0.00273	0.01678	0.16	0.873
x1x3	-0.00947	0.01678	-0.56	0.579
x2x3	0.00652	0.01678	0.39	0.702
x1cuad	0.05625	0.01929	2.92	0.009
x2cuad	0.03576	0.01929	1.85	0.079
x3cuad	0.11220	0.01929	5.82	0.000

S = 0.0671080 R-cuad. = 74.6% R-cuad.(ajustado) = 63.2%

PRESS = 0.195469 R-cuad.(pred) = 44.97%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	0.265108	0.029456	6.54	0.000
Error residual	20	0.090070	0.004503		
Total	29	0.355177			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
5	2	0.83913	A
7	2	0.81143	A
1	2	0.80080	A B
13	2	0.80054	A B
6	2	0.74755	B C
0	2	0.71142	C D
14	2	0.68776	C D E
3	2	0.68082	D E
2	2	0.66575	D E
8	2	0.66456	D E
4	2	0.65321	D E
10	2	0.63609	E
9	2	0.53572	F
11	2	0.53088	F
12	2	0.52503	F
15	2	0.50698	F

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

---

## C.2 Color

### C.2.1. Análisis de regresión: L vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$L = 81.5 - 0.470 x_1 + 0.503 x_2 - 0.484 x_3 + 0.003 x_1x_2 + 0.181 x_1x_3 - 0.098 x_2x_3 + 0.269 x_1\text{cuad} + 0.018 x_2\text{cuad} + 0.315 x_3\text{cuad}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	81.5315	0.6991	116.62	0.000
x1	-0.4701	0.1903	-2.47	0.023
x2	0.5031	0.1903	2.64	0.016
x3	-0.4840	0.1903	-2.54	0.019
x1x2	0.0027	0.2486	0.01	0.991
x1x3	0.1810	0.2486	0.73	0.475
x2x3	-0.0981	0.2486	-0.39	0.697
x1cuad	0.2693	0.2858	0.94	0.357
x2cuad	0.0179	0.2858	0.06	0.951
x3cuad	0.3149	0.2858	1.10	0.284

S = 0.994540    R-cuad. = 53.0%    R-cuad.(ajustado) = 31.9%

PRESS = 43.0312    R-cuad.(pred) = 0.00%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	22.3150	2.4794	2.51	0.042
Error residual	20	19.7822	0.9891		
Total	29	42.0972			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
3	2	84.670	A
1	2	82.785	A B
12	2	82.730	A B
13	2	82.653	A B
9	2	82.557	A B
2	2	82.202	A B
5	2	82.075	A B
14	2	82.073	A B
7	2	81.988	A B C
10	2	81.912	A B C
8	2	81.737	A B C
4	2	81.712	A B C
15	2	81.552	A B C
11	2	80.317	B C
6	2	80.233	B C
0	2	78.643	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

---

## C.2.2. Análisis de regresión: a vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$a = - 4.26 - 0.0232 x_1 - 0.0832 x_2 - 0.0184 x_3 - 0.0937 x_1x_2 + 0.0029 x_1x_3 + 0.0808 x_2x_3 + 0.084 x_1\text{cuad} + 0.094 x_2\text{cuad} - 0.032 x_3\text{cuad}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	-4.2586	0.2462	-17.30	0.000
x1	-0.02323	0.06701	-0.35	0.732
x2	-0.08322	0.06701	-1.24	0.229
x3	-0.01838	0.06701	-0.27	0.787
x1x2	-0.09375	0.08756	-1.07	0.297
x1x3	0.00292	0.08756	0.03	0.974
x2x3	0.08083	0.08756	0.92	0.367
x1cuad	0.0843	0.1007	0.84	0.412
x2cuad	0.0937	0.1007	0.93	0.363
x3cuad	-0.0318	0.1007	-0.32	0.756

S = 0.350230    R-cuad. = 24.8%    R-cuad.(ajustado) = 0.0%

PRESS = 5.68479    R-cuad.(pred) = 0.00%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	0.8096	0.0900	0.73	0.675
Error residual	20	2.4532	0.1227		
Total	29	3.2629			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
4	2	-3.7400	A
1	2	-3.8467	A
5	2	-3.8517	A
11	2	-3.9100	A
3	2	-3.9250	A
6	2	-3.9783	A
8	2	-4.1083	A
2	2	-4.1100	A
10	2	-4.1717	A
7	2	-4.1800	A
15	2	-4.1883	A
9	2	-4.2783	A
12	2	-4.4867	A
13	2	-4.5183	A
0	2	-4.5700	A
14	2	-4.5883	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

---

### C.2.3. Análisis de regresión: b vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$b = 5.44 - 0.182 x_1 + 0.0675 x_2 + 0.131 x_3 + 0.302 x_1x_2 - 0.040 x_1x_3 - 0.205 x_2x_3 + 0.276 x_1\text{cuad} + 0.287 x_2\text{cuad} + 0.400 x_3\text{cuad}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	5.4412	0.3099	17.56	0.000
x1	-0.18210	0.08435	-2.16	0.043
x2	0.06748	0.08435	0.80	0.433
x3	0.13069	0.08435	1.55	0.137
x1x2	0.3017	0.1102	2.74	0.013
x1x3	-0.0396	0.1102	-0.36	0.723
x2x3	-0.2050	0.1102	-1.86	0.078
x1cuad	0.2764	0.1267	2.18	0.041
x2cuad	0.2867	0.1267	2.26	0.035
x3cuad	0.4002	0.1267	3.16	0.005

S = 0.440852    R-cuad. = 59.1%    R-cuad.(ajustado) = 40.7%

PRESS = 8.68480    R-cuad.(pred) = 8.66%

#### Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	5.6212	0.6246	3.21	0.014
Error residual	20	3.8870	0.1944		
Total	29	9.5082			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
14	2	7.1833	A
2	2	7.0300	A B
7	2	6.7017	A B
1	2	6.6550	A B
12	2	6.5533	A B
9	2	6.4633	A B
3	2	6.3917	A B C
4	2	6.2433	A B C
10	2	6.2233	A B C
13	2	6.2033	A B C
11	2	6.1917	A B C
8	2	6.0983	A B C
6	2	5.9750	A B C
5	2	5.4617	B C
15	2	5.4000	B C
0	2	4.7800	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

---

### C.2.4. Análisis de regresión: E vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$E = 3.02 - 0.487 x_1 + 0.420 x_2 - 0.366 x_3 + 0.068 x_1x_2 + 0.166 x_1x_3 - 0.193 x_2x_3 + 0.335 x_1\text{cuad} + 0.167 x_2\text{cuad} + 0.440 x_3\text{cuad}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	3.0195	0.6317	4.78	0.000
x1	-0.4871	0.1719	-2.83	0.010
x2	0.4196	0.1719	2.44	0.024
x3	-0.3665	0.1719	-2.13	0.046
x1x2	0.0683	0.2246	0.30	0.764
x1x3	0.1657	0.2246	0.74	0.469
x2x3	-0.1931	0.2246	-0.86	0.400
x1cuad	0.3347	0.2583	1.30	0.210
x2cuad	0.1673	0.2583	0.65	0.525
x3cuad	0.4402	0.2583	1.70	0.104

S = 0.898553    R-cuad. = 53.9%    R-cuad.(ajustado) = 33.1%

PRESS = 35.1306    R-cuad.(pred) = 0.00%

#### Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	18.8770	2.0974	2.60	0.036
Error residual	20	16.1480	0.8074		
Total	29	35.0250			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
3	2	6.2935	A
1	2	4.6048	A B
12	2	4.4568	A B
9	2	4.2907	A B
13	2	4.2564	A B
2	2	4.2498	A B
14	2	4.2362	A B
7	2	3.8910	A B
10	2	3.6051	A B
5	2	3.5950	A B
4	2	3.5003	A B
8	2	3.4266	A B
15	2	3.0258	B
11	2	2.4916	B
6	2	2.2369	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

---

## C.3 Tamaño de Partícula.

### C.3.1. Análisis de regresión: D32 vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$D32 = 6.18 - 0.189 x_1 + 0.0904 x_2 + 0.0666 x_3 + 0.079 x_1x_2 - 0.215 x_1x_3 + 0.105 x_2x_3 - 0.377 x_1\text{cuad} - 0.596 x_2\text{cuad} - 0.505 x_3\text{cuad}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	6.1801	0.3073	20.11	0.000
x1	-0.18913	0.08363	-2.26	0.035
x2	0.09041	0.08363	1.08	0.293
x3	0.06663	0.08363	0.80	0.435
x1x2	0.0791	0.1093	0.72	0.477
x1x3	-0.2146	0.1093	-1.96	0.064
x2x3	0.1055	0.1093	0.97	0.346
x1cuad	-0.3771	0.1256	-3.00	0.007
x2cuad	-0.5963	0.1256	-4.75	0.000
x3cuad	-0.5051	0.1256	-4.02	0.001

S = 0.437089    R-cuad. = 64.8%    R-cuad.(ajustado) = 49.0%

PRESS = 8.33134    R-cuad.(pred) = 23.32%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	7.0446	0.7827	4.10	0.004
Error residual	20	3.8209	0.1910		
Total	29	10.8655			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
15	2	6.0938	A
9	2	5.4381	A B
4	2	5.3704	A B
10	2	5.2917	A B C
14	2	5.2218	A B C
12	2	4.9011	B C D
1	2	4.8785	B C D
13	2	4.7842	B C D
2	2	4.7340	B C D
7	2	4.6900	B C D
11	2	4.5888	B C D
0	2	4.5281	B C D
3	2	4.2804	B C D
5	2	4.1591	C D
8	2	4.1089	C D
6	2	3.9687	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

---

### C.3.2. Análisis de regresión: D10 vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$D10 = 4.33 - 0.327 x_1 + 0.020 x_2 + 0.015 x_3 - 0.007 x_1x_2 - 0.000 x_1x_3 + 0.010 x_2x_3 - 1.08 x_1\text{cuad} - 0.945 x_2\text{cuad} - 1.58 x_3\text{cuad}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	4.3347	0.4751	9.12	0.000
x1	-0.3274	0.1293	-2.53	0.020
x2	0.0201	0.1293	0.16	0.878
x3	0.0146	0.1293	0.11	0.911
x1x2	-0.0068	0.1689	-0.04	0.968
x1x3	-0.0002	0.1689	-0.00	0.999
x2x3	0.0097	0.1689	0.06	0.955
x1cuad	-1.0789	0.1942	-5.55	0.000
x2cuad	-0.9453	0.1942	-4.87	0.000
x3cuad	-1.5840	0.1942	-8.16	0.000

S = 0.675800 R-cuad. = 78.6% R-cuad.(ajustado) = 69.0%

PRESS = 20.0628 R-cuad.(pred) = 53.08%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	33.6296	3.7366	8.18	0.000
Error residual	20	9.1341	0.4567		
Total	29	42.7637			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
15	2	4.1650	A
9	2	3.0210	B
12	2	2.1940	B
11	2	2.1175	B
10	2	0.5345	C
4	2	0.4710	C
2	2	0.4070	C
3	2	0.4050	C
8	2	0.3900	C
1	2	0.3690	C
13	2	0.3510	C
14	2	0.3470	C
6	2	0.3421	C
5	2	0.3160	C
7	2	0.3140	C
0	2	0.2957	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

### C.3.3. Análisis de regresión: D50 vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$D50 = 5.66 - 0.360 x_1 + 0.274 x_2 + 0.436 x_3 - 0.015 x_1x_2 - 0.307 x_1x_3 + 0.078 x_2x_3 - 0.561 x_1\text{cuad} - 0.979 x_2\text{cuad} - 1.64 x_3\text{cuad}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	5.6643	0.4981	11.37	0.000
x1	-0.3601	0.1356	-2.66	0.015
x2	0.2737	0.1356	2.02	0.057
x3	0.4360	0.1356	3.22	0.004
x1x2	-0.0145	0.1771	-0.08	0.936
x1x3	-0.3065	0.1771	-1.73	0.099
x2x3	0.0779	0.1771	0.44	0.665
x1cuad	-0.5608	0.2037	-2.75	0.012
x2cuad	-0.9788	0.2037	-4.81	0.000
x3cuad	-1.6406	0.2037	-8.06	0.000

S = 0.708579    R-cuad. = 83.1%    R-cuad.(ajustado) = 75.6%

PRESS = 21.7150    R-cuad.(pred) = 63.56%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	49.5486	5.5054	10.97	0.000
Error residual	20	10.0417	0.5021		
Total	29	59.5903			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
15	2	5.5350	A
9	2	4.5650	A B
10	2	4.3450	A B C
4	2	4.1000	B C D
2	2	3.4650	B C D E
12	2	3.4265	B C D E
11	2	3.1190	C D E
0	2	2.7015	D E F
8	2	2.6760	D E F
3	2	2.3065	E F G
14	2	1.5300	F G
7	2	1.3985	F G
6	2	1.3890	F G
1	2	1.2730	F G
13	2	1.2715	F G
5	2	1.1330	G

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

---

### C.3.3. Análisis de regresión: D90 vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$D90 = 6.40 - 0.267 x_1 + 0.158 x_2 + 0.061 x_3 + 0.168 x_1x_2 - 0.315 x_1x_3 + 0.182 x_2x_3 - 0.403 x_1\text{cuad} - 0.536 x_2\text{cuad} - 0.615 x_3\text{cuad}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	6.4050	0.4539	14.11	0.000
x1	-0.2668	0.1236	-2.16	0.043
x2	0.1584	0.1236	1.28	0.215
x3	0.0610	0.1236	0.49	0.627
x1x2	0.1684	0.1614	1.04	0.309
x1x3	-0.3146	0.1614	-1.95	0.065
x2x3	0.1821	0.1614	1.13	0.273
x1cuad	-0.4028	0.1856	-2.17	0.042
x2cuad	-0.5362	0.1856	-2.89	0.009
x3cuad	-0.6149	0.1856	-3.31	0.003

S = 0.645706    R-cuad. = 55.4%    R-cuad.(ajustado) = 35.4%

PRESS = 18.2139    R-cuad.(pred) = 2.69%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	10.3780	1.1531	2.77	0.028
Error residual	20	8.3387	0.4169		
Total	29	18.7167			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
15	2	6.2500	A
9	2	5.8650	A B
4	2	5.5900	A B C
10	2	5.5700	A B C
12	2	5.5350	A B C
14	2	5.4000	A B C
11	2	5.1450	A B C
1	2	4.9500	A B C D
2	2	4.8600	A B C D
13	2	4.8350	A B C D
7	2	4.8050	A B C D
0	2	4.6850	A B C D
3	2	4.3000	B C D
8	2	4.1850	B C D
5	2	4.1300	C D
6	2	3.4330	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

---

## C.4 Incorporación de Aire.

### C.4.1. Análisis de regresión: IA vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$IA = 21.1 - 0.355 x_1 + 0.680 x_2 + 0.218 x_3 - 0.139 x_1x_2 - 0.694 x_1x_3 - 0.972 x_2x_3 + 1.92 x_1^2 + 1.92 x_2^2 + 1.33 x_3^2$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	21.1426	0.9575	22.08	0.000
x1	-0.3550	0.2606	-1.36	0.188
x2	0.6805	0.2606	2.61	0.017
x3	0.2182	0.2606	0.84	0.412
x1x2	-0.1389	0.3405	-0.41	0.688
x1x3	-0.6944	0.3405	-2.04	0.055
x2x3	-0.9722	0.3405	-2.86	0.010
x1cuad	1.9205	0.3915	4.91	0.000
x2cuad	1.9205	0.3915	4.91	0.000
x3cuad	1.3313	0.3915	3.40	0.003

S = 1.36203    R-cuad. = 72.1%    R-cuad.(ajustado) = 59.6%

PRESS = 85.3099    R-cuad.(pred) = 35.94%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	96.066	10.674	5.75	0.001
Error residual	20	37.102	1.855		
Falta de ajuste	5	5.003	1.001	0.47	0.794
Error puro	15	32.099	2.140		
Total	29	133.169			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
12	2	27.778	A
9	2	27.778	A
7	2	27.778	A
3	2	27.778	A
2	2	27.778	A
4	2	26.667	A B
14	2	25.556	A B C
11	2	25.556	A B C
10	2	25.556	A B C
8	2	25.556	A B C
6	2	25.556	A B C
5	2	25.556	A B C
13	2	24.444	A B C
1	2	23.333	A B C
15	2	21.111	B C
0	2	20.000	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

---

## C.5 Firmeza.

### C.5.1. Análisis de regresión: Firmeza vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$\text{Firmeza} = 7.48 + 1.07 x_1 + 0.830 x_2 + 0.528 x_3 + 2.18 x_1x_2 + 2.57 x_1x_3 + 0.601 x_2x_3 - 1.34 x_1\text{cuad} + 0.180 x_2\text{cuad} - 0.118 x_3\text{cuad}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	7.479	1.352	5.53	0.000
x1	1.0733	0.3680	2.92	0.009
x2	0.8299	0.3680	2.26	0.035
x3	0.5278	0.3680	1.43	0.167
x1x2	2.1801	0.4808	4.53	0.000
x1x3	2.5666	0.4808	5.34	0.000
x2x3	0.6013	0.4808	1.25	0.226
x1cuad	-1.3426	0.5528	-2.43	0.025
x2cuad	0.1800	0.5528	0.33	0.748
x3cuad	-0.1177	0.5528	-0.21	0.834

S = 1.92338 R-cuad. = 79.7% R-cuad.(ajustado) = 70.5%

PRESS = 160.118 R-cuad.(pred) = 55.98%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	289.751	32.195	8.70	0.000
Error residual	20	73.988	3.699		
Total	29	363.739			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
8	2	15.985	A
11	2	8.335	B
12	2	7.967	B
7	2	7.891	B
0	2	7.570	B
6	2	7.459	B
15	2	7.423	B
14	2	7.330	B
13	2	7.287	B
1	2	6.879	B
9	2	4.670	C
3	2	4.279	C D
10	2	3.018	C D E
2	2	2.301	D E
4	2	2.158	E
5	2	1.719	E

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

---

## C.6 Velocidad de Drenado.

### C.6.1. Análisis de regresión: Drenado vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$\text{Drenado} = 0.789 - 0.0494 x_1 - 0.0072 x_2 + 0.0425 x_3 - 0.0014 x_1x_2 + 0.0006 x_1x_3 - 0.0260 x_2x_3 + 0.0343 x_1\text{cuad} + 0.0639 x_2\text{cuad} + 0.0501 x_3\text{cuad}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	0.78942	0.05275	14.97	0.000
x1	-0.04939	0.01436	-3.44	0.003
x2	-0.00725	0.01436	-0.50	0.619
x3	0.04248	0.01436	2.96	0.008
x1x2	-0.00140	0.01876	-0.07	0.941
x1x3	0.00059	0.01876	0.03	0.975
x2x3	-0.02601	0.01876	-1.39	0.181
x1cuad	0.03430	0.02157	1.59	0.127
x2cuad	0.06389	0.02157	2.96	0.008
x3cuad	0.05011	0.02157	2.32	0.031

S = 0.0750362    R-cuad. = 61.8%    R-cuad.(ajustado) = 44.5%

PRESS = 0.244204    R-cuad.(pred) = 17.05%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	0.181796	0.020200	3.59	0.008
Error residual	20	0.112609	0.005630		
Total	29	0.294405			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
14	2	1.08570	A
4	2	1.02900	A B
2	2	1.02645	A B
3	2	1.02585	A B
11	2	1.01505	A B C
1	2	0.99925	A B C D
12	2	0.92820	B C D E
6	2	0.90345	C D E F
7	2	0.89490	D E F
9	2	0.88990	D E F G
10	2	0.88600	D E F G
0	2	0.82500	E F G
8	2	0.82040	E F G
5	2	0.79390	F G
15	2	0.78890	F G
13	2	0.77960	G

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

---

## C.6.2. Análisis de regresión: Gota vs. x1, x2, ...

La ecuación de regresión es

$$\text{Gota} = 1382 + 9.4 x_1 + 47.5 x_2 - 61.5 x_3 + 57.5 x_1x_2 - 44.1 x_1x_3 + 59.1 x_2x_3 \\ - 30.1 x_1\text{cuad} - 91.0 x_2\text{cuad} - 5.2 x_3\text{cuad}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	1382.11	89.19	15.50	0.000
x1	9.42	24.28	0.39	0.702
x2	47.49	24.28	1.96	0.065
x3	-61.50	24.28	-2.53	0.020
x1x2	57.47	31.72	1.81	0.085
x1x3	-44.09	31.72	-1.39	0.180
x2x3	59.09	31.72	1.86	0.077
x1cuad	-30.10	36.47	-0.83	0.419
x2cuad	-90.95	36.47	-2.49	0.021
x3cuad	-5.22	36.47	-0.14	0.888

S = 126.879    R-cuad. = 58.8%    R-cuad.(ajustado) = 40.3%

PRESS = 733117    R-cuad.(pred) = 6.29%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	460355	51151	3.18	0.015
Error residual	20	321967	16098		
Total	29	782322			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
13	2	1612.0	A
0	2	1419.0	A B
15	2	1382.8	A B
8	2	1374.8	A B
5	2	1319.5	A B
7	2	1319.0	A B
9	2	1296.5	A B
10	2	1293.8	A B
4	2	1286.3	A B
1	2	1284.5	A B
2	2	1280.3	A B
12	2	1278.8	A B
14	2	1119.0	B
3	2	1111.0	B
6	2	1082.0	B
11	2	967.3	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.