

ARTÍCULO DE REVISIÓN

La homogeneización a ultra-alta presión (UHPH): Efectos en la leche y aplicaciones en la fabricación de quesos

Homogenization at ultra-high pressure (UHPH). Effects on milk and applications in cheese manufacture

Jhony Mayta-Hancco^{1,3}, Antonio-José Trujillo², Bibiana Juan²

RESUMEN

La ultra-alta presión de homogeneización (UHPH) es una tecnología emergente con aplicaciones en el procesamiento de fluidos. Si bien, esta tecnología se basa en los mismos principios de los homogeneizadores convencionales, los nuevos diseños y uso de materiales de construcción de las válvulas han permitido alcanzar presiones de 350 a 400 MPa. Las ventajas de la UHPH incluyen la reducción del tamaño de partícula, incremento de la vida útil mediante de la inactivación de microorganismos y mejoras en la funcionalidad debido al aumento de la capacidad y estabilidad de la emulsión, con efectos mínimos sobre el valor nutricional y las características sensoriales. Asimismo, los efectos térmicos son menores debido al tiempo de tratamiento (menos de un segundo). La tecnología UHPH es un proceso sostenible que tiene una aplicación potencial en las industrias cosmética, farmacéutica y láctea. En la presente revisión se muestra una visión general de algunos estudios recientes de la aplicación de la tecnología UHPH en el tratamiento de la leche y en la fabricación de quesos.

Palabras clave: ultra-alta presión de homogeneización, leche, aspectos tecnológicos, queso

¹ Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional de Moquegua (UNAM), Moquegua, Perú

² Centre d'Innovació, Recerca i Transferència en Tecnologia dels Aliments (CIRTTA), Departament de Ciència Animal i dels Aliments, Universitat Autònoma de Barcelona, España

³ E-mail: jmaytah@unam.edu.pe

Recibido: 28 de marzo de 2019

Aceptado para publicación: 31 de enero de 2020

Publicado: 22 de junio de 2020

ABSTRACT

Ultra-high-pressure homogenization (UHPH) is an emerging technology with applications in fluid processing. Although, this technology is based on the same principles of conventional homogenizers, the new designs and use of valve construction materials have made it possible to reach pressures of 350 to 400 MPa. The advantages of UHPH include the reduction of the particle size, an increase in the useful life through the inactivation of microorganisms and improvements in functionality due to the increase in the capacity and stability of the emulsion, with minimal effects on the nutritional value and sensory characteristics. Also, the thermal effects are less due to the treatment time (less than one second). UHPH technology is a sustainable process that has a potential application in the cosmetic, pharmaceutical and dairy industries. This review shows an overview of some recent studies of the application of UHPH technology in milk treatment and cheese manufacturing.

Key words: ultra-high-pressure homogenisation, milk, technological aspects, cheese

INTRODUCCIÓN

La homogeneización se define como el proceso de división de grandes glóbulos de grasa polidispersos de una emulsión aceite en agua en un gran número de glóbulos grasos pequeños de menor tamaño y de manera homogénea (Michalski y Januel, 2006). Esta reducción homogénea del tamaño se logra forzando el paso a alta presión de las partículas suspendidas en el fluido a través de una válvula (Donsi *et al.*, 2009). Los homogeneizadores pueden estar equipados con dos válvulas conectadas en serie; una primera válvula de homogeneización que trabaja a mayor presión (conocida también como primera etapa), y una segunda válvula (o segunda etapa) que trabaja a presiones de homogeneización inferiores (normalmente de 10-20% de la presión de la primera válvula). Los efectos combinados de estas dos válvulas permiten la obtención de emulsiones mucho más estables físicamente, con menor cantidad de agregados de partículas en suspensión (Walstra *et al.*, 2006).

En 1900, Auguste Gaulin desarrolló la primera válvula de homogeneización, mediante la cual surgió una alternativa tecnológica para la estabilización de emulsiones alimentarias. Desde ese momento, la homogeneización se ha aplicado ampliamente en la industria química, farmacéutica y alimentaria para la estabilización de emulsiones y la obtención de productos con nuevas propiedades reológicas (Floury *et al.*, 2000; Thiebaud *et al.*, 2003). El homogeneizador diseñado por Gaulin, es conocido actualmente como homogeneizador convencional.

En la industria láctea, las presiones utilizadas en los homogeneizadores convencionales oscilan entre ~20 y 60 MPa (Dumay *et al.*, 2013) con el propósito principal de reducir el tamaño de los glóbulos de grasa (Coutouly *et al.*, 2014). En general, el tamaño de los glóbulos grasos nativos de la leche se encuentra mayormente en 1-10 μm . Sin embargo, con el proceso de homogeneización se consigue reducir el tamaño ($<1 \mu\text{m}$) (Hayes y Kelly, 2003a) e incrementar la su-

perficie (5-10 veces) de los nuevos glóbulos de grasa (Keenan *et al.*, 1983). Por otro lado, la homogeneización también ha sido utilizada ampliamente en emulsiones para evitar los fenómenos de desestabilización, clarificación y cremado (Thiebaud *et al.*, 2003).

Dependiendo del nivel de presión nominal, la tecnología se denominará homogeneización a alta presión (HPH, ~150 a 200 MPa) u homogeneización a ultra-alta presión (UHPH, ~350 a 400 MPa) (Dumay *et al.*, 2013). La HPH y UHPH son tratamientos no térmicos que se basa en los mismos principios que la homogeneización convencional, pero gracias al diferente diseño de la geometría de la cámara de reacción y el tipo de material, puede alcanzar presiones de 10 a 20 veces superior a los homogeneizadores clásicos (Paquin, 1999).

En general, los beneficios de la HPH y UHPH incluyen la prolongación de la vida útil a través de la inactivación de microorganismos y mejoras en la funcionalidad de las matrices alimentarias (Patrignani y Lanciotti, 2016), debido al aumento de la capacidad y estabilidad de la emulsión, sin afectar el valor nutricional y las características sensoriales (Zamora y Guamis, 2015). Entre otras ventajas importantes de esta tecnología están, además de la reducción del tamaño del glóbulo de grasa (Thiebaud *et al.*, 2003), la desfloculación de agregados de glóbulos de grasa y la dispersión uniforme de aglomerados (Floury *et al.*, 2000), cambios en la conformación de la proteína, aumento de la viscosidad y estabilidad de la emulsión (Desrumaux y Marcand, 2002) e inactivación de enzimas (Hayes *et al.*, 2005).

EQUIPOS DE HPH Y UHPH

Desde un punto de vista tecnológico, un homogeneizador consta principalmente de una bomba y una válvula de homogeneización. La bomba se utiliza para forzar el paso del fluido dentro de la válvula donde se produce la

homogeneización (Diels y Michiels, 2006). Cuando el fluido pasa por la válvula, este es sometido a caída repentina de presión, fenómenos de cizalla, impacto, cavitación, esfuerzo de corte y turbulencia (Paquin, 1999; Patrignani y Lanciotti, 2016), causando la disrupción de sus partículas, incrementos de temperatura y una reducción concomitante de la carga microbiana (Thiebaud *et al.*, 2003).

A principios de los años 80 fue introducida una nueva tecnología para la producción de emulsiones finas, basada en la disponibilidad de dispositivos capaces de generar y manejar presiones en líquidos por encima de 100 MPa, y presiones muy altas de 350 a 500 MPa con nuevos diseños en la cámara de homogeneización (Donsi *et al.*, 2009). En 1987, el equipo *Microfluidizer* de la Corporación Microfluidics (USA) fue introducido en la industria alimentaria alcanzando presiones de 100 MPa (Paquin, 1999).

Los modelos *Emulsiflex*, desarrollados por la compañía Avestin (Canadá), fueron semejantes a un homogeneizador convencional, pero con un diseño novedoso de las válvulas que permitió alcanzar presiones de 220 MPa (Paquin, 1999), aunque actualmente son capaces de alcanzar presiones de hasta 300 MPa, por medio del ajuste micrométrico de la boquilla y el uso de materiales altamente resistentes al desgaste, tales como el acero inoxidable o cerámica. El uso de los homogeneizadores *Emulsiflex* se describen para la ruptura de suspensiones celulares a presiones comprendidas entre 100 y 300 MPa, así como para la producción de nanosuspensiones y desnaturalización de proteínas (Donsi *et al.*, 2009). Otros fabricantes de homogeneizadores a alta presión son Bee International (USA), Gea Niro Soavi (Italia) y APV (Reino Unido), los cuales proponen dispositivos piloto capaces de ejercer presiones de homogeneización de 100 a 200 MPa, para un flujo promedio de 160 l/h a 200 MPa (Zamora y Guamis, 2015).

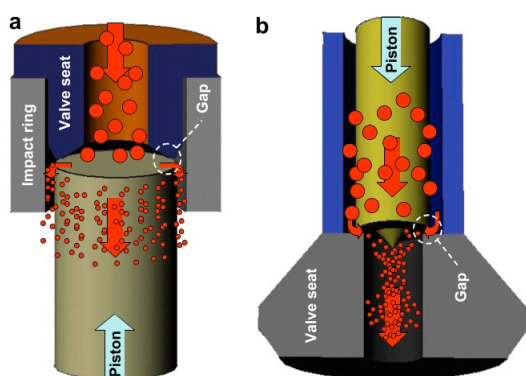


Figura 1. Válvulas de homogenización de Manton-Gaulin APV y Stansted Fluid Power (Donsi *et al.*, 2009)

Diversos autores (Middelberg, 1995; Pandolfi, 1999; Miller *et al.*, 2002) centraron sus esfuerzos en el estudio de los procesos físicos responsables de la ruptura de los glóbulos de grasa y microorganismos en homogeneizadores clásicos de alta presión, tales como el APV-Gaulin y Rannie (Figura 1a). En la válvula homogeneizadora clásica, el fluido es alimentado axialmente en el asiento de la válvula y luego se acelera radialmente hacia un pequeño orificio denominado «espacio de válvula» comprendida entre el pistón y el asiento de válvula. Una vez que el fluido sale del espacio de válvula (10 a 30 μm), se convierte en un chorro radial que impacta contra el cabezal de la válvula antes de salir del homogeneizador a presión atmosférica (Kleinig y Middelberg, 1998). La presión de funcionamiento se controla ajustando el espacio de válvula (Patrignani y Lanciotti, 2016) y reduciendo este espacio, se logra incrementar la presión del homogeneizador (Donsi *et al.*, 2009).

En 2006, la empresa Stansted Fluid Power Ltd. (Reino Unido) modificó la geometría de la válvula de homogenización Stansted (Figura 1b) en comparación a la clásica APV-Gaulin. Las válvulas Stansted fueron modificadas con asientos y agujas contruados en cerámica (Zamora y Guamis, 2015)

o revestidos con diamante artificial (Dumay *et al.*, 2013), material que es conocido por soportar los niveles de presión utilizados en los procesos de HPH y UHPH (Patrignani y Lanciotti, 2016). En las válvulas Stansted, el fluido se alimenta axialmente a lo largo de la parte móvil de la válvula (pistón) y luego se acelera radialmente a través del estrecho espacio entre la válvula y el asiento de válvula (Donsi *et al.*, 2013). El tamaño de la abertura ($\sim 2\text{-}2.5\ \mu\text{m}$), la velocidad del fluido y la presión a la cual el fluido es sometido dependen de la fuerza que actúa sobre el pistón de la válvula, que puede ajustarse para regular la intensidad de la homogeneización. La caída de presión del líquido en la válvula se denomina presión de homogeneización. El homogeneizador Stansted está equipado con dos válvulas de homogeneización para indicar la presión y temperatura del fluido (Donsi *et al.*, 2009), siendo la primera de alta presión y la segunda de baja presión (Dumay *et al.*, 2013). Por lo tanto, se pueden realizar procesos utilizando la primera válvula de presión (primera etapa) o la segunda válvula de presión (segunda etapa) o una combinación de ambas.

Actualmente existen empresas que ofrecen la posibilidad de construir prototipos capaces de superar los 300 MPa, por ejemplo, UHP 4000 de Gea Niro Saovi o NanoDeBee® de Bee International. Sin embargo, debe destacarse que el diseño de las válvulas difiere drásticamente de las válvulas Stansted (Zamora y Guamis, 2015). La geometría de las válvulas de homogeneización parecen ser un factor muy importante que influyen en el flujo de la emulsión y la ruptura del tamaño de las partículas (Tesch *et al.*, 2003) e inactivación microbiana (Middelberg, 1995). Al respecto, Donsi *et al.* (2012, 2013) evaluaron el efecto de la geometría de dos válvulas de homogeneización con presiones desde 70-300 MPa en la inactivación microbiana de nanoemulsiones, resultando más eficiente la válvula cónica de pistón (3-14 μm) de Stansted Fluid Power, que la válvula de orificio (130 μm) de Bee International, resultado

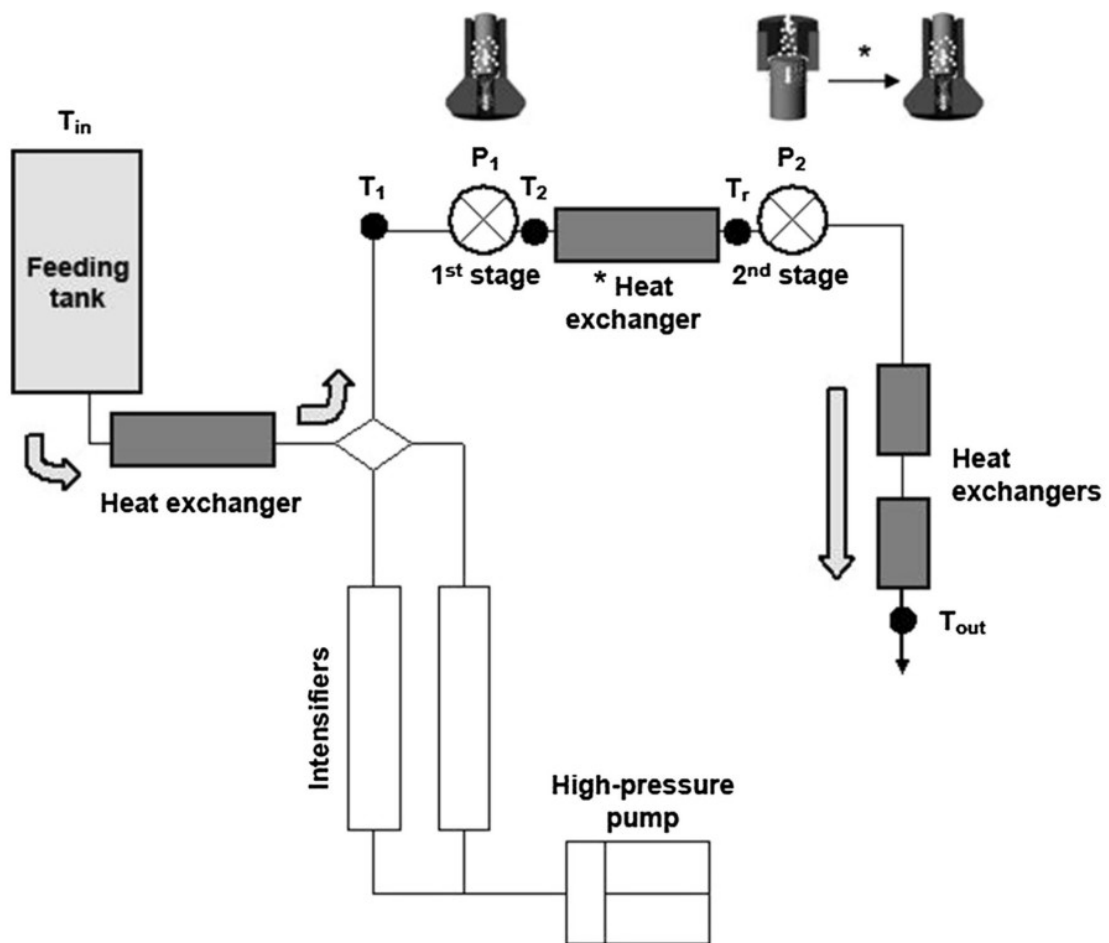


Figura 2. Esquema del equipo UHPH, modelo FPG 11300 (*modificación) (Zamora y Guamis, 2015)

atribuido principalmente a una mayor cavitación e interacción mecánica directa de las células y la válvula cónica de pistón.

Por otro lado, Zamora y Guamis (2015) hicieron modificaciones al esquema del sistema de UHPH, diseñado y patentado por el CERPTA, modelo FPG11300 (Figura 2). La principal modificación fue el remplazo de la válvula convencional de la segunda etapa por una válvula Stansted. Asimismo, se incorporó un sistema de refrigeración entre las dos válvulas con el fin de minimizar el efecto térmico del tratamiento, lo que permitió un enfriamiento instantáneo y una disminución de la temperatura de salida.

Recientemente la empresa Ypsicon (Barcelona, España) tiene la capacidad de fabricar prototipos de laboratorio (10 l/h), de planta piloto (150 l/h) e incluso equipos industriales (1000 l/h) que pueden alcanzar los 300 MPa. Algunos investigadores del CIRTTA (Centre d'Innovació, Recerca i Transferència en Tecnologia dels Aliments, UAB) son inventores de la patente internacional EP10380094.2 «Sistema continuo y procedimiento de esterilización y estabilización física de fluidos bombeables mediante ultra alta presión de homogeneización», patente que se ha extendido a la Unión Europea, Estados Unidos, Turquía, México, Brasil, China, Japón, Corea del Sur, India y Australia.

HOMOGENIZACIÓN A ULTRA-ALTA PRESIÓN

Efectos sobre la Carga Microbiana de la Leche

Middelberg (1995) realizó una revisión de los posibles procesos físicos implicados en la ruptura microbiana durante la homogeneización a alta presión. Entre los mecanismos de ruptura celular propuestos se encuentran: la repentina caída de presión, fuerzas de corte y de torsión, turbulencia y, más probablemente, la cavitación. En general, son varios los factores que determinan el nivel de inactivación microbiana en el producto, entre los que destacan: la temperatura de entrada del producto, la presión de homogeneización (Diels *et al.*, 2005; Donsì *et al.*, 2009; Kheadr *et al.*, 2002; Thiebaud *et al.*, 2003), la geometría de la válvula de homogeneización (Donsì *et al.*, 2013), el número de ciclos o etapas que se realicen sobre el fluido (Hayes y Kelly, 2003b; Picart *et al.*, 2006; Trujillo *et al.*, 2016), la composición de la membrana celular, la forma de los microorganismos (Vachon *et al.*, 2002; Lanciotti *et al.*, 2006; Donsì *et al.*, 2009; Patrignani y Lanciotti, 2016;), los recuentos iniciales de microorganismos en el producto (Moroni *et al.*, 2002; Vachon *et al.*, 2002), la presencia de inhibidores microbianos o conservantes naturales (Vannini *et al.*, 2004), el tipo de matriz y las características fisicoquímicas del producto fresco (Kheadr *et al.*, 2002; Vachon *et al.*, 2002; Diels *et al.*, 2005; Briñez *et al.*, 2006).

Aunque la UHPH se considere una tecnología no térmica, cuando el fluido atraviesa la válvula de homogeneización, la temperatura del fluido aumenta de ~2 a 2.5 °C por cada 10 MPa (Hayes y Kelly, 2003b; Thiebaud *et al.*, 2003). Este incremento de temperatura en tiempos cortos (menos de un segundo) debería ser considerado como un factor para explicar la inactivación microbiana por tratamientos de homogeneización a alta presión (Trujillo *et al.*, 2016). Thiebaud *et al.* (2003)

evaluaron la población de la flora endógena de la leche sometida a UHPH (300 MPa) a Ti (del inglés *temperature inlet*) de 4 y 24 °C, concluyendo que tanto la presión de homogeneización y las Ti influyen en la inhibición de la flora endógena de la leche de 1 a 3 ciclos logarítmicos. Por otro lado, Pereda *et al.* (2007) reportaron reducciones en la población de coliformes, enterococos y lactobacilos de 3 y 4 ciclos logarítmicos en muestras de leche tratadas por UHPH (300 MPa) con Ti = 30 y 40 °C, en comparación a las leches tratadas por métodos convencionales. Zamora *et al.* (2012b) observaron una reducción de ~3 ciclos logarítmicos en la población de bacterias totales y psicrotróficas en muestras de leche tratada por UHPH (300 MPa, Ti=30 °C) en comparación a las tecnologías convencionales de pasteurización y homogeneización. En otros estudios, Briñez *et al.* (2006a,b; 2007) también lograron inactivar las células vegetativas de bacterias patógenas (*Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, y *Salmonella* spp) en muestras de leche tratada por UHPH.

La aplicación del tratamiento UHPH ha demostrado tener la misma eficacia del tratamiento de pasteurización para garantizar la estabilidad microbiológica de la leche. Sin embargo, la UHPH es menos efectiva en la inactivación de las esporas bacterianas, incluso a presiones máximas posibles, lo que limita su aplicación para obtener alimentos de calidad estéril si no es acompañada con una Ti >60 °C (Trujillo *et al.*, 2016).

Efectos sobre los Componentes de la Leche

Tamaño del glóbulo de grasa

La tecnología UHPH se ha utilizado principalmente en la leche para reducir el tamaño de los glóbulos de grasa. En leches tratadas por UHPH, y según intensidad de presión y temperatura de entrada (Ti) del producto, se han reportado reducciones del ta-

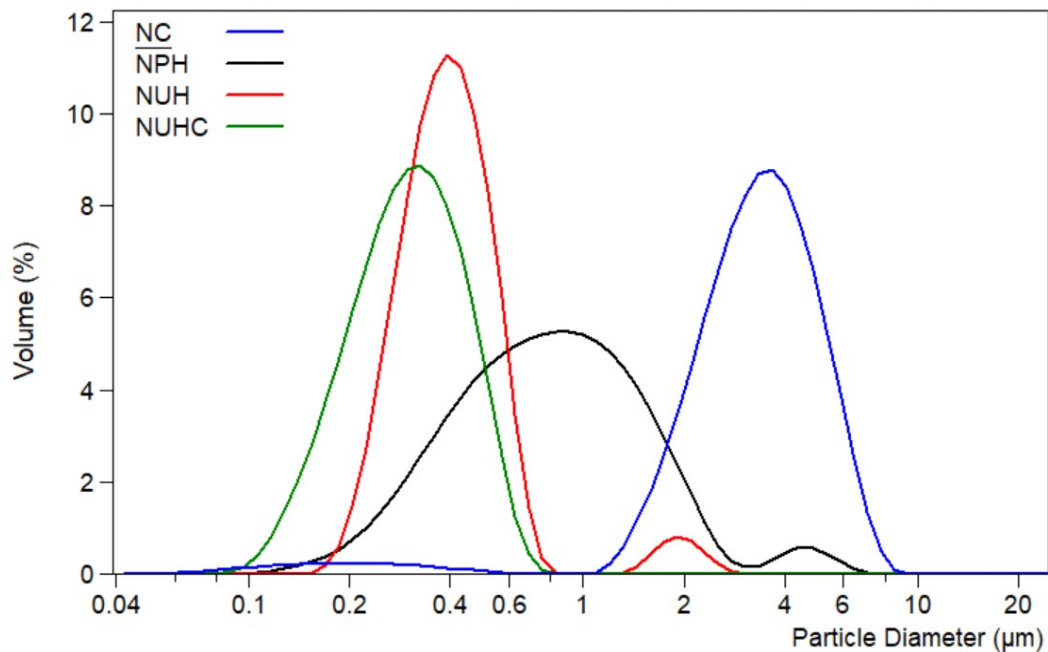


Figura 3. Distribuciones del tamaño de partícula de muestras de nata cruda, homogeneizada-pasteurizada y homogeneizada por ultra-alta presión (UHPH) después del tratamiento. NC: nata sin tratamiento; NPH: nata homogeneizada-pasteurizada (15 MPa, 65 °C por 30 min); NUH: nata homogeneizada por UHPH (300 MPa, $T_i = 40$ °C); NUHC: nata homogeneizada por UHPH (300 MPa, $T_i = 40$ °C) con 1.5% de caseinato de sodio (Rodarte et al., 2018)

maño de los glóbulos de grasa por debajo de <0.6 µm (Pereda *et al.*, 2007). Asimismo, Picart *et al.* (2006) observaron reducciones del tamaño de partícula (hasta 0.19 µm) a medida que se incrementaba la presión de homogeneización a 300 MPa. Sin embargo, el aumento de la presión de homogeneización lleva a la formación de agregados de glóbulos de grasa (~ 1 µm) en muestras de leche tratadas por UHPH (Picart *et al.*, 2006; Pereda *et al.*, 2007; Trujillo *et al.*, 2016), atribuida principalmente a la mayor exposición superficial de los nuevos glóbulos grasos e insuficiente caseína disponible para recubrirlos. Pereda *et al.* (2007) observaron formaciones de agregados en leche tratada por UHPH (300 MPa, simple etapa) en el orden de 5 y 10% a $T_i = 40$ y 30 °C, respectivamente. Contrariamente, Thiebaud *et al.*

(2003) no reportaron formaciones de agregados de glóbulos de grasa en muestras de leche tratada por UHPH a 300 MPa y $T_i = 24$ °C.

Rodarte *et al.* (2018) observaron variaciones en la distribución del tamaño de partícula de diferentes muestras de nata tratada por UHPH y homogeneización convencional (Figura 3). Todas las muestras, a excepción de la nata homogeneizada por UHPH presentaron una curva de distribución de tamaño de partícula bimodal. Con el tratamiento UHPH se logró reducir el diámetro de los glóbulos de grasa hasta ~ 0.4 µm en el pico principal; sin embargo, apareció la formación de agregados en un pico pequeño a 2 µm. Estos agregados podrían haberse formado por la falta de proteínas, que resultó ser insuficiente.

ciente para cubrir los nuevos glóbulos de grasa formados por la homogeneización, promoviendo así la floculación. Sin embargo, la adición de 1.5% de caseinato de sodio a la nata antes del tratamiento UHPH fue suficiente para cubrir la superficie de los nuevos glóbulos de grasa formados, estabilizándolos y previniendo la formación de agregados o flóculos. Asimismo, el diámetro del tamaño de partícula en la NUHC fue reducido hasta $\sim 0.3 \mu\text{m}$.

Proteínas

Los fluidos alimentarios, en su paso por la válvula de homogeneización, se ven sometidos a fenómenos físicos que afectan a las características de sus proteínas. En la leche tratada por UHPH se ha descrito la ruptura y reducción del tamaño de las micelas de caseína en leche (Kheadr *et al.*, 2002) y la desnaturalización de proteínas séricas (Pereda *et al.*, 2007), afectando estas estructuras proteicas, llevando a la incorporación de las micelas de caseína y sus subunidades en la membrana del glóbulo graso si el tratamiento se aplica a leche con grasa (Metzger y Mistry, 1994). Kheadr *et al.* (2002) observaron reducciones del tamaño de las micelas de caseína pasando de 200-300 nm a 125-150 nm mediante homogeneización (200 MPa, $T_i = 28 \text{ }^\circ\text{C}$). Roach y Harte (2008) también observaron reducciones en el tamaño de las micelas de caseína de 278 a 171 nm en muestras de aislados de micela de caseína tratadas a 200 MPa. Sin embargo, al incrementar las presiones de homogeneización a 250 y 350 MPa se han descrito incrementos en el tamaño de las micelas de caseína a 178 y 200 nm. Durante el tratamiento de homogeneización a presiones $>200 \text{ MPa}$, las micelas de caseína pueden incrementar de tamaño por agregación debido a la presencia de grandes cantidades de calcio por la solubilización del fosfato cálcico micelar (Trujillo *et al.*, 2016).

Por otro lado, a medida que se incrementan las presiones y las temperaturas de entrada y del proceso alcanzado durante el tratamiento UHPH de la leche, se produce desnaturalización de las proteínas del suero

siendo la desnaturalización de la β -lactoglobulina y en mayor proporción en comparación a la α -lactoalbúmina (Hayes *et al.*, 2005; Zamora *et al.*, 2012a).

Inactivación de enzimas

En general, el tratamiento de la leche por UHPH produce inactivación de las enzimas nativas de la leche (lactoperoxidasa, lipasa, plasmina y fosfatasa alcalina) en proporciones variables. Estas variaciones podrían explicarse por las diferencias en las máquinas y el diseño y construcción de la válvula, así como la temperatura de entrada y tiempo en el que la leche alcanza la más alta temperatura en el equipo UHPH (Trujillo *et al.*, 2016). El tratamiento UHPH (300 MPa, $T_i = 30 \text{ y } 40 \text{ }^\circ\text{C}$) aplicado a la leche produce una disminución de la actividad enzimática de la plasmina y plasminógeno (sistema enzimático con importancia ya que delimita la vida útil de las leches UHT, y ejerce una importante actividad proteolítica en los quesos madurados) en comparación a las muestras de leche cruda. Aproximadamente, el 70% de la actividad de la plasmina de la leche cruda es inactivada en la leche por UHPH (Pereda *et al.*, 2008). Por otro lado, Hayes y Kelly (2003b) observaron una inactivación de la plasmina (65%) a 200 MPa en comparación a las muestras tratadas de homogeneización convencional. Hayes *et al.* (2005) también observaron inactivaciones del 85 y 95% de plasmina en muestras de leche homogeneizadas a 150 y 250 MPa, respectivamente.

Minerales

Zamora *et al.* (2007) evaluaron el contenido de Ca, P y Mg en el suero obtenido por centrifugación de geles enzimáticos producidos a partir de leche tratada por UHPH (300 MPa). Los resultados mostraron una disminución de la cantidad de los minerales de la leche en la fase soluble al incrementar la presión de homogeneización. Por otro lado, Sandra y Dagleish (2005) reportaron una mayor cantidad de Ca soluble en leche tratada a 200 MPa en comparación a leche pas-

teurizada. La aplicación de la homogeneización de la leche produce una disrupción parcial de las micelas de caseína que pueden ocasionar una transferencia de Ca y de fosfato inorgánico a la fase soluble.

Efectos en la Aptitud Tecnológica de la Leche para Quesería

Zamora *et al.* (2007) observaron una mejora en las propiedades de coagulación enzimática de la leche tratada por UHPH (300 MPa, Ti = 30 y 40 °C, simple etapa) atribuido al efecto combinado de la presión (que produce la reducción del tamaño de partícula) y al incremento de temperatura (que produce la desnaturalización de las proteínas séricas) en la formación de nuevas estructuras lipoproteicas de la leche que aumentan el número de enlaces potenciales para crear el gel. Sin embargo, dichas propiedades fueron afectadas negativamente con la utilización de la segunda etapa (30 MPa), la cual produjo geles más débiles, similares a los obtenidos por el tratamiento de homogeneización-pasteurización. Lodaite *et al.* (2009) estudiaron las propiedades reológicas de geles enzimáticos obtenidos a partir de leche desnatada (0.08% de grasa) a 55 °C y tratadas por UHPH (300 MPa, 2 etapas), observando que el tratamiento UHPH produjo geles más duros y formados en menor tiempo, en comparación a geles elaborados con leche sin homogeneizar. La influencia ocasionada por el tratamiento UHPH a la leche desnatada ocurre principalmente por reducción del tamaño de las micelas de caseína.

APLICACIONES EN LA FABRICACIÓN DE QUESOS

La posibilidad de afectar la tecnología UHPH sobre la distribución del tamaño de partícula de los glóbulos de grasa, la estructura de las proteínas y la actividad enzimática, además de reducir significativamente la carga bacteriana de la leche y su evolución durante su almacenamiento, ha estimulado estudios

sobre la elaboración de queso a partir de leche tratada por UHPH (Trujillo *et al.*, 2016).

Quesos frescos

Zamora *et al.* (2011) evaluaron las características texturales de quesos frescos producidos a partir de leches tratadas por UHPH (300 MPa, Ti = 30 °C) en comparación a los quesos procedentes de leche tratadas convencionalmente, tales como la pasteurización (80 °C, 15 s) y pasteurización-homogeneización (15+3 MPa a 60 °C, y 80 °C por 15 s). Los resultados mostraron que tanto la homogeneización convencional y la UHPH produjeron cambios en las características texturales de los quesos. Los quesos elaborados con leche homogeneizada convencionalmente fueron firmes, menos deformables, pastosos, granulados, más blancos y con mayor capacidad de retención de agua, pero con una menor sensación en boca en comparación a los quesos elaborados con leche pasteurizada. Sin embargo, el efecto de la UHPH fue mayor que la homogeneización convencional obteniéndose una mayor firmeza y menor deformabilidad en los quesos elaborados con leche UHPH que fue atribuido a la incorporación de proteínas séricas a la cuajada y la reducción del tamaño del glóbulo de grasa.

Las diferencias en la composición (tipología del agua, contenido de proteína) y la microestructura, podrían explicar las características sensoriales de los quesos. En general, se destacaron varias mejoras en los quesos frescos elaborados a partir de leche tratada por UHPH (300 MPa, Ti = 30 °C) en comparación a los quesos elaborados con leche tratada por tecnologías convencionales como la pasteurización y homogeneización. Los quesos UHPH presentaron una mayor humedad, menor actividad lipolítica, menor sinéresis durante el almacenamiento (Zamora *et al.*, 2015), menor crecimiento de bacterias totales y psicrotrofos y con un incremento de la vida útil (13-19 días) (Zamora *et al.*, 2012b, 2015). Sin embargo, los valores de

oxidación lipídica obtenidos en los quesos elaborados a partir de leche tratadas por UHPH fue mayor que en el resto de los quesos, aunque sensorialmente este defecto no fue detectado (Zamora *et al.*, 2015).

Escobar *et al.* (2011) evaluaron el rendimiento, composición, textura y propiedades organolépticas de quesos frescos elaborados a partir de leches crudas y pasteurizadas (65 °C, 30 min), ambas sometidas a diferentes presiones (0-300 MPa, 2 etapas). Los resultados mostraron que la aplicación combinada de tratamientos de pasteurización y UHPH a la leche produjo quesos frescos con mayor humedad y mayor rendimiento (1% por cada 100 MPa), debido principalmente a la mayor retención de las proteínas del suero durante la formación de las cuajadas, y al aumento de la capacidad de retención de agua de las proteínas. Las muestras de leche tratadas por pasteurización y 300 MPa produjeron quesos más desmenuzables, con mayor humedad, mayor rendimiento y una fina matriz de caseína-suero capaz de retener mejor el suero dulce. Sin embargo, se evidenció una mayor rancidez enzimática debido a la enzima lipasa activa.

Mayta-Hanco *et al.* (2019) evaluaron el efecto de la incorporación de la nata tratada por UHPH (300 MPa, Ti = 40 °C) con o sin adición de caseinato de sodio, en comparación con natas tratadas mediante homogenización-pasteurización (15 MPa, 65 °C, 30 min) y pasteurización (65 °C, 30 min), encontrando un incremento del 5 al 13% de rendimiento quesero, para la homogenización-pasteurización y UHPH, respectivamente. La adición de caseinato de sodio a la nata tratada por UHPH incrementó el rendimiento del queso en un 22%, obteniendo el mismo valor que los quesos enteros. Estos quesos fueron menos duros, elásticos, cohesivos, gomosos y masticables que sus homólogos reducidos en grasa, mostrando valores similares a los quesos enteros. Los panelistas los describieron con mayor sensación acuosa y fueron los más valorados en la escala de preferencia.

Quesos madurados

Kheadr *et al.*, (2002) evaluaron la calidad reológica y microestructural del queso Cheddar elaborado a partir de leches tratadas por homogenización a 200 MPa, Ti = 28 °C y 5 ciclos de 1 min, en comparación a quesos elaborados con leche pasteurizada. Los resultados mostraron que la leche homogenizada produjo quesos con mayor contenido de humedad, proteína y rendimiento en comparación a los quesos elaborados con leche pasteurizada. Asimismo, estos quesos presentaron una textura más firme, elástica y cohesiva debido a la formación de una matriz de caseína muy compacta y regular en la cual se detectó la presencia de glóbulos grasos de pequeño tamaño, no observándose diferencias de recuentos de bacterias totales en todas las muestras de quesos Cheddar.

Juan *et al.* (2015, 2016) evaluaron la proteólisis y lipólisis de quesos de cabra elaborados a partir de leche tratada por UHPH (200 MPa, Ti = 30 °C) en comparación con los elaborados a partir de leche pasteurizada-homogenizada y pasteurizada, respectivamente. Los quesos elaborados a partir de leche tratada por UHPH presentaron una mayor hidrólisis de las caseínas α_2 -, β - y de la para κ -caseína que los elaborados con leche pasteurizada, hecho que fue atribuido a la mayor exposición del sustrato a las enzimas proteolíticas. El tratamiento UHPH de la leche incrementó significativamente los niveles de nitrógeno soluble del queso y péptidos hidrofóbicos e hidrofílicos. Por otro lado, no observaron variaciones en la lipólisis de las muestras de quesos UHPH y los elaborados por pasteurización; sin embargo, la homogenización convencional produjo una extensa lipólisis de los quesos debido a la reducción del tamaño del glóbulo de grasa, incrementando el área para la actividad de la lipasa. Las diferencias en el nivel de lipólisis de los quesos elaborados por UHPH y homogenización convencional podrían estar relacionadas con la intensidad de los tratamientos y por los cambios producidos por

estas tecnologías en la MFGM (del inglés *milk fat globule membrane*), modificando la accesibilidad de la enzima a la grasa.

La combinación de tratamientos convencionales y la UHPH también pueden ser utilizados para reducir la carga microbiana de la leche y durante la maduración de los quesos. López-Pedemonte, *et al.* (2006) evaluaron la calidad microbiológica de quesos blandos elaborados a partir de leches inoculadas con *Staphylococcus aureus* y sometidas a una combinación de tratamientos de pasteurización, alta presión hidrostática (HHP) y UHPH. Con el tratamiento UHPH (330 + 30 MPa, Ti = 6 °C) lograron reducir la población de *St. aureus* de 8.5 log cfu/g a 5, ~2,8 y ~1 log ufc/g para los días 1, 15 y 30 de maduración, respectivamente. Asimismo, incrementando la Ti a 20 °C del tratamiento UHPH, lograron inactivar completamente el *St. aureus* a los 15 días de maduración. El tratamiento adicional de HHP (400 MPa) a la UHPH tuvo un efecto sinérgico.

CONCLUSIONES

La UHPH tiene un gran potencial como tecnología emergente para reemplazar a la homogeneización convencional y los tratamientos térmicos, proporcionando estabilidad física y microbiológica de los alimentos líquidos. El tratamiento UHPH a la leche de fabricación quesera ha mostrado resultados prometedores, tales como, alta estabilidad física debido a una mayor reducción del tamaño de partícula, disminución de la carga bacteriana (incluida la reducción de microorganismos patógenos), inactivación de enzimas y cambios en la estructura de las proteínas (agregación de micelas de caseína). Los cambios obtenidos en la microestructura y las características de textura de los quesos apuntan al potencial de la tecnología UHPH para el desarrollo de una nueva generación de quesos.

LITERATURA CITADA

1. **Briñez WJ, Roig-Sagués AX, Hernández-Herrero MM, Guamis-López B. 2006a.** Inactivation of *Listeria innocua* in milk and orange juice by ultrahigh-pressure homogenization. *J Food Protect* 69: 86-92. doi: 10.4315/0362-028x-69.1.86
2. **Briñez WJ, Roig-Sagués AX, Hernández-Herrero MM, Guamis-López B. 2006b.** Inactivation of two strains of *Escherichia coli* inoculated into whole and skim milk by ultrahigh-pressure homogenisation. *Lait* 86: 241-249. doi: 10.1051/lait:2006006
3. **Briñez WJ, Roig-Sagués AX, Hernández-Herrero MM, Guamis-López B. 2007.** Inactivation of *Staphylococcus* spp strains in whole milk and orange juice using ultra high pressure homogenisation at inlet temperatures of 6 and 20 °C. *Food Control* 18: 1282-1288. doi: 10.1016/J.foodcont.2006.09.002
4. **Coutouly A, Riaublanc A, Axelos M, Gaucher I. 2014.** Effect of heat treatment, final pH of acidification, and homogenization pressure on the texture properties of cream cheese. *Dairy Sci Technol* 94: 125-144. doi: 10.1007/s13594-013-0148-z
5. **Desrumaux A, Marcand J. 2002.** Formation of sunflower oil emulsions stabilized by whey proteins with high-pressure homogenization (up to 350 MPa): effect of pressure on emulsion characteristics. *Int J Food Sci Tech* 37: 263-269. doi: 10.1046/j.1365-2621.2002.00565.x
6. **Diels AM, Michiels CW. 2006.** High-pressure homogenization as a non-thermal technique for the inactivation of microorganisms. *Crit Rev Microbiol* 32: 201-216. doi: 10.1080/104084106010-23516

7. **Diels AM, Callewaert L, Wuytack EY, Masschalck B, Michiels CW. 2005.** Inactivation of *Escherichia coli* by high-pressure homogenisation is influenced by fluid viscosity but not by water activity and product composition. *Int J Food Microbiol* 101: 281-291. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2004.11.011
8. **Donsì F, Annunziata M, Ferrari G. 2013.** Microbial inactivation by high pressure homogenization: Effect of the disruption valve geometry. *J Food Eng* 115: 362-370. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.10.046
9. **Donsì F, Ferrari G, Maresca P. 2009.** High-pressure homogenization for food sanitization. In: Barbosa-Cánovas G, Mortimer A, Lineback D, *et al.* (eds). *Global issues in food science and technology*. USA: Academic Press. p 309-352.
10. **Donsì F, Sessa, M, Ferrari G. 2012.** Effect of emulsifier type and disruption chamber geometry on the fabrication of food nanoemulsions by high pressure homogenization. *Ind Eng Chem Res* 51: 7606-7618. doi: 10.1021/ie2017898
11. **Dumay E, Chevalier-Lucia D, Picart-Palmade L, Benzaria A, Gràcia-Julià A, Blayo C. 2013.** Technological aspects and potential applications of (ultra) high-pressure homogenisation. *Trends Food Sci Tech* 31: 13-26. doi: 10.1016/j.tifs.2012.03.005
12. **Floury J, Desrumaux A, Lardières J. 2000.** Effect of high-pressure homogenization on droplet size distributions and rheological properties of model oil-in-water emulsions. *Innov Food Sci Emerg* 1: 127-134. doi: 10.1016/S1466-8564-(00)00012-6
13. **Hayes MG, Kelly AL. 2003a.** High pressure homogenisation of milk (b) effects on indigenous enzymatic activity. *J Dairy Res* 70: 307-313. doi: 10.1017/S0022029903006320
14. **Hayes MG, Kelly AL. 2003b.** High pressure homogenisation of raw whole bovine milk (a) effects on fat globule size and other properties. *J Dairy Res* 70: 297-305. doi: 10.1017/S0022029903006320
15. **Hayes MG, Fox PF, Kelly AL. 2005.** Potential applications of high pressure homogenisation in processing of liquid milk. *J Dairy Res* 72: 25-33. doi: 10.1017/S0022029904000524
16. **Juan B, Quevedo JM, Zamora A, Guamis B, Trujillo AJ. 2015.** Lipolysis of cheeses made from goat milk treated by ultra-high pressure homogenization. *Lwt-Food Sci Technol* 60: 1034-1038. doi: 10.1016/j.lwt.2014.10.003
17. **Juan B, Zamora A, Quevedo JM, Trujillo AJ. 2016.** Proteolysis of cheese made from goat milk treated by ultra high pressure homogenisation. *Lwt-Food Sci Technol* 69: 17-23. doi: 10.1016/j.lwt.-2015.12.013
18. **Keenan TW, Moon TW, Dylewski DP. 1983.** Lipid globules retain globule membrane material after homogenization. *J Dairy Res* 66: 196-203. doi: 10.3168/JDS.S0022-0302(83)81777-9
19. **Kheadr EE, Vachon JF, Paquin P, Fliss I. 2002.** Effect of dynamic high pressure on microbiological, rheological and microstructural quality of Cheddar cheese. *Int Dairy J* 12: 435-446. doi: 10.1016/S0958-6946(01)00104-2
20. **Kleinig AR, Middelberg APJ. 1998.** On the mechanism of microbial cell disruption in high pressure homogenisation. *Chem Eng Sci* 53: 891-898. doi: 10.1016/S0009-2509(97)00414-4
21. **Lanciotti R, Vannini L, Patrignani F, Iucci L, Vallicelli M, Ndagijimana M, Guerzoni ME. 2006.** Effect of high pressure homogenisation of milk on cheese yield and microbiology, lipolysis and proteolysis during ripening of Caciotta cheese. *J Dairy Res* 73: 216-226. doi: 10.1017/S0022029905001640
22. **Lodaite K, Chevalier F, Armaforte E, Kelly AL. 2009.** Effect of high-pressure homogenisation on rheological properties of rennet-induced skim milk and standardised milk gels. *J Dairy Res* 76: 294-300. doi: 10.1017/S002202990-9004117

23. **López-Pedemonte T, Brinez WJ, Roig-Sagués AX, Guamis B. 2006.** Fate of *Staphylococcus aureus* in cheese treated by ultrahigh pressure homogenization and high hydrostatic pressure. *J Dairy Res* 89: 4536-4544. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(06)72502-4
24. **Mayta-Hancco J, Trujillo AJ, Zamora A, Juan B. 2019.** Effect of ultra-high pressure homogenisation of cream on the physicochemical and sensorial characteristics of fat-reduced starter-free fresh cheeses. *Lwt-Food Sci Technol* 110: 292–298. doi: 10.1016/j.lwt.2019.04.096
25. **Metzger LE, Mistry VV. 1994.** A new approach using homogenization of cream in the manufacture of reduced fat cheddar cheese. 1. Manufacture, composition, and yield. *J Dairy Res* 77: 3506-3515. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(94)77292-1
26. **Michalski MC, Januel C. 2006.** Does homogenization affect the human health properties of cow's milk? *Trends Food Sci Tech* 17: 423-437. doi: 10.1016/j.tifs.2006.02.004
27. **Middelberg APJ. 1995.** Process-scale disruption of microorganisms. *Biotechnol Adv* 13: 491-551. doi: 10.1016/0734-9750(95)02007-P
28. **Miller J, Rogowski M, Kelly W. 2002.** Using a CFD model to understand the fluid dynamics promoting E.coli breakage in a high-pressure homogenizer. *Biotechnol Progr* 18: 1060-1067. doi: 10.1021/bp020010z
29. **Moroni O, Jean J, Autret J, Fliss I. 2002.** Inactivation of lactococcal bacteriophages in liquid media using dynamic high pressure. *Int Dairy J* 12: 907-913. doi: 10.1016/S0958-6946(02)-00118-8
30. **Pandolfe WD. 1999.** Homogenisers. In: Francis FJ (ed). *Encyclopaedia of food science and technology*. 2nd ed. New York, USA: Wiley. p 1289-1294.
31. **Paquin P. 1999.** Technological properties of high pressure homogenizers: the effect of fat globules, milk proteins, and polysaccharides. *Int Dairy J* 9: 329-335. doi: 10.1016/S0958-6946(99)00083-7
32. **Patrignani F, Lanciotti R. 2016.** Applications of high and ultra high pressure homogenization for food safety. *Front Microbiol* 7: 1-13. doi: 10.3389/fmicb.-2016.01132
33. **Pereda J, Ferragut V, Buffa M, Guamis B, Trujillo AJ. 2007.** Effects of ultra-high pressure homogenization on microbial and physicochemical shelf life of milk. *J Dairy Res* 90: 1081-1093. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(07)71595-3
34. **Pereda J, Ferragut V, Buffa M, Guamis B, Trujillo AJ. 2008.** Proteolysis of ultra-high pressure homogenised treated milk during refrigerated storage. *Food Chem* 111: 696-702. doi: 10.1016/j.foodchem.2008.04.040
35. **Picart L, Thiebaud M, René M, Pierre Guiraud J, Cheftel JC, Dumay E. 2006.** Effects of high pressure homogenisation of raw bovine milk on alkaline phosphatase and microbial inactivation. a comparison with continuous short-time thermal treatments. *J Dairy Res* 73: 454-463. doi: 10.1017/S00220-29906001853
36. **Roach A, Harte F. 2008.** Disruption and sedimentation of casein micelles and casein micelle isolates under high-pressure homogenization. *Innov Food Sci Emerg* 9: 1-8. doi: 10.1016/j.ifset.-2007.03.027
37. **Rodarte D, Zamora A, Trujillo AJ, Juan B. 2018.** Effect of ultra-high pressure homogenization on cream: Shelf life and physicochemical characteristics. *Lwt-Food Sci Technol* 92: 108-115. doi: 10.1016/j.lwt.2018.02.020
38. **Sandra S, Dalgleish DG. 2005.** Effects of ultra-high-pressure homogenization and heating on structural properties of casein micelles in reconstituted skim milk powder. *Int Dairy J* 15: 1095-1104. doi: 10.1016/j.idairyj.2004.11.015
39. **Tesch S, Freudig B, Schubert H. 2003.** Production of emulsions in high-pressure homogenizers - Part I: Disruption and stabilization of droplets. *Chem Eng Sci* 26: 569-573. doi: 10.1002/ceat.200-390086

40. **Thiebaud M, Dumay E, Picart L, Guiraud JP, Cheftel JC. 2003.** High-pressure homogenisation of raw bovine milk. Effects on fat globule size distribution and microbial inactivation. *Int Dairy J* 13: 427-439. doi: 10.1016/S0958-6946(03)00051-7
41. **Trujillo AJ, Roig-Sagués AX, Zamora A, Ferragut V. 2016.** High-pressure homogenization for structure modification. In: Knoerzer K, Juliano P, Smithers G. (eds). *Innovative food processing technologies*. UK: Woodhead Publishing. p 315-344.
42. **Vachon JF, Kheadr EE, Giasson J, Paquin P, Fliss I. 2002.** Inactivation of foodborne pathogens in milk using dynamic high pressure. *J Food Protect* 65: 345-352. doi: 10.4315/0362-028x-65.2.345
43. **Vannini L, Lanciotti R, Baldi D, Guerzoni ME. 2004.** Interactions between high pressure homogenization and antimicrobial activity of lysozyme and lactoperoxidase. *Int J Food Microbiol* 94: 123-135. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.-2004.01.005
44. **Walstra P, Wouters JTM, Geurts TJ. 2006.** *Dairy science and technology*. 2nd ed. Boca Raton, USA: CRC Press LLC. 763 p.
45. **Zamora A, Guamis B. 2015.** Opportunities for ultra-high-pressure homogenisation (UHPH) for the food industry. *Food Eng Rev* 7: 130-142. doi: 10.1007/s12393-014-9097-4
46. **Zamora A, Ferragut V, Jaramillo PD, Guamis B, Trujillo AJ. 2007.** Effects of ultra-high pressure homogenization on the cheese-making properties of milk. *J Dairy Sci* 90: 13-23. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(07)72604-8
47. **Zamora A, Ferragut V, Jaramillo PD, Guamis B, Trujillo AJ. 2011.** Effect of ultra-high pressure homogenisation of milk on the texture and water-typology of a starter-free fresh cheese. *Innov Food Sci Emerg* 12: 484-490. doi: 10.1016/j.ifset.2011.06.002
48. **Zamora A, Ferragut V, Guamis B, Trujillo AJ. 2012a.** Changes in the surface protein of the fat globules during ultra-high pressure homogenisation and conventional treatments of milk. *Food Hydrocolloid* 29: 135-143. doi: 10.1016/j.foodhyd.2012.02.012
49. **Zamora A, Ferragut V, Jaramillo PD, Guamis B, Trujillo AJ. 2012b.** Ultra-high pressure homogenisation of milk: technological aspects of cheese-making and microbial shelf life of a starter-free fresh cheese. *J Dairy Sci* 79: 168-175. doi: 10.1017/S0022029912000052
50. **Zamora A, Juan B, Trujillo AJ. 2015.** Compositional and biochemical changes during cold storage of starter-free fresh cheeses made from ultra-high-pressure homogenised milk. *Food Chem* 176: 433-440. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.-12.070