



# **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE EL EFECTO DE LA HOMOGENEIZACIÓN POR ALTAS PRESIONES EN HARINAS Y SUS COMPONENTES**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

Curso: 2019/20

**Alumna: Marina Carús Prieto**  
**Tutores: Manuel Gómez Pallarés**  
**Ángela Bravo Núñez**

**Máster en Calidad, Desarrollo e Innovación de Alimentos**  
E.T.S. Ingenierías Agrarias, Campus de la Yutera (Palencia)  
Universidad de Valladolid

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	2
<b>ABSTRACT</b> .....	2
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>2. TECNOLOGÍAS ESTUDIADAS</b> .....	3
2.1. Homogeneización por altas presiones .....	3
2.2. Microfluidización.....	4
2.3. Interés de la homogeneización de altas presiones en harinas .....	6
<b>3. EFECTO DE LAS ALTAS PRESIONES EN LAS PROTEÍNAS</b> .....	7
<b>4. EFECTO DE LAS ALTAS PRESIONES EN EL ALMIDÓN</b> .....	9
<b>5. EFECTO DE LAS ALTAS PRESIONES EN LA FIBRA</b> .....	13
<b>6. EFECTO EN HARINAS</b> .....	17
<b>7. CONCLUSIONES</b> .....	18
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	19

## **RESUMEN**

Tanto la homogeneización por altas presiones como la microfluidización han demostrado ser capaces de modificar las características de las harinas y de sus componentes. En el caso de las proteínas de harinas de cereales y leguminosas, los estudios disponibles indican que la aplicación de tratamientos de homogeneización por altas presiones producen un cambio de conformación, sin afectar a la estructura primaria de las proteínas, por lo que simplemente provocan un cambio de funcionalidad. Respecto a los almidones, la homogeneización por altas presiones llevan a la modificación y rotura de los gránulos, que desemboca en una redistribución del tamaño de partículas y una modificación de propiedades reológicas y tecnológicas que permite la obtención de materias primas con unas propiedades tecnológicas diferentes a las de los almidones nativos. Finalmente, en cuanto a la fibra, los tratamientos por altas presiones provocan una redistribución de las fracciones soluble e insoluble, y modifican sus características sensoriales y funcionales. En conjunto, se comprobó que los efectos de esta tecnología eran mayores conforme se incrementaba la presión aplicada, aunque también aumentaban con el número de ciclos. En vista de esto, las altas presiones se suelen aplicar a la mejora de las características de harinas sin gluten, con el fin de elaborar productos para el colectivo celíaco con una mayor calidad y aceptabilidad.

## **ABSTRACT**

Both high pressure homogenization and microfluidization have shown to be capable of modifying the characteristics of flours and their components. In the case of cereal and legume flour proteins, available studies indicate that the application of high pressure homogenization treatments produce a change in conformation, without affecting the primary structure of the proteins, thus simply causing a change of functionality. With regard to starches, high pressure homogenization leads to the modification and breakage of the granules, which promotes a redistribution of the particle size and a modification of rheological and technological properties that allows the obtaining of raw materials with technological properties different from those of native starches. Finally, regarding fiber, high pressure treatments cause a redistribution of soluble and insoluble fractions, and modify their sensory and functional characteristics. Overall, it was found that the effects of this technology were greater as the pressure applied increased, although they also increased with the number of cycles. In view of this, high pressures are usually applied to improve the characteristics of gluten-free flours, in order to produce products for the celiac group with higher quality and acceptability.

**Key words:** Homogeneización, microfluidización, harinas, altas presiones

## **1. INTRODUCCIÓN**

La tecnología de altas presiones presenta dos vertientes. Por un lado, la de altas presiones hidrostáticas, que alcanza una presión por encima de los 800MPa, sobre el alimento crudo. Esta tecnología consiste en un tratamiento no térmico capaz de modificar la calidad del producto e inactivar ciertos microorganismos presentes en él, sin necesidad de un aumento de la temperatura, lo cual hace que estas tecnologías puedan ser una alternativa interesante al procesado térmico tradicional (Akhmazillah, Farid & Silva, 2013). Los productos más frecuentemente tratados de esta forma son alimentos líquidos, pero también se ha utilizado en carne, marisco, cereales, frutas y vegetales (Martínez-Monteagudo, Yan & Balasubramaniam, 2016). Por otro lado, las altas presiones también se aplican en los tratamientos conocidos como homogeneización por altas presiones y microfluidización, los cuales se han utilizado para crear productos con texturas nuevas, ya que afecta a la estructura de los mismos (He et al., 2016). La homogeneización presenta muchas posibilidades de aplicación en diferentes tipos de alimentos, tanto en el procesado como en la conservación de los mismos (Teixeira et al., 2014). En general, las aplicaciones más comunes son la mejora de la calidad de bebidas, el aumento de la vida útil de productos líquidos o la modificación de la formulación (Martínez-Monteagudo, Yan & Balasubramaniam, 2016). Esta revisión bibliográfica se centra en el efecto de esta tecnología sobre la harina y sus componentes, presentando en primer lugar las tecnologías y su interés en el producto estudiado, posteriormente el efecto que tienen sobre cada uno de los componentes de las harinas y, para terminar, las modificaciones generales en el producto completo y su utilidad.

## **2. TECNOLOGÍAS ESTUDIADAS**

### **2.1. HOMOGENEIZACIÓN POR ALTAS PRESIONES**

Las características de la homogeneización por altas presiones son similares a las de la homogeneización tradicional, ya que ambas se basan en el paso de un líquido por una válvula con un agujero regulable, de modo que adquiere una velocidad y presión determinadas (Velázquez-Estrada et al., 2011). Las altas presiones, además, son capaces de inactivar ciertos microorganismos al tiempo que modifican las características del producto logrando una homogeneización (Velázquez-Estrada et al., 2011; Martínez-Monteagudo, Yan & Balasubramaniam, 2016).

En la Figura 1 se esquematiza el diagrama de flujo de un homogeneizador de altas presiones (en este caso, con control de temperaturas). En él se observa, en primer lugar, un tanque de alimentación, seguido de intercambiadores de calor y reguladores de presión, la primera y segunda válvula de homogeneización, el tubo de mantenimiento,

el sistema de enfriado y, finalmente, el tanque de almacenamiento o, en su caso, el sistema de envasado aséptico.

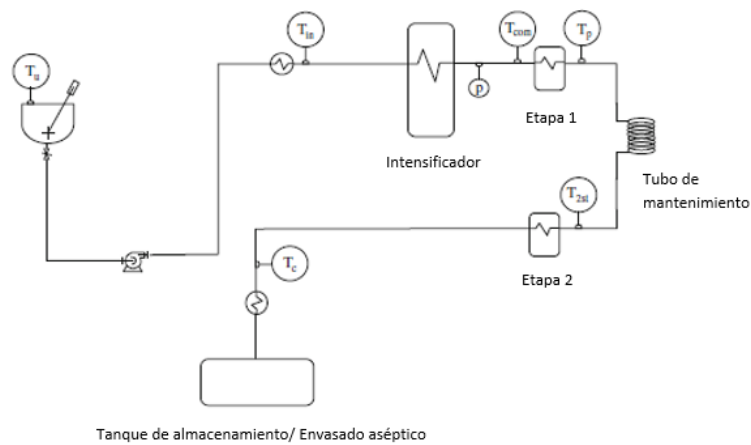


Figura 1. Esquema del proceso de homogeneización por altas presiones (Figura adaptada de Martínez-Monteagudo, Yan & Balasubramaniam, (2016)).

Durante el proceso, el producto tratado sufre un gran cizallamiento, cavitación y turbulencias, lo cual da lugar a los diferentes efectos buscados (mezcla, dispersión, emulsión, reestructuración o reducción del tamaño de partícula). El tratamiento presenta, por tanto, un gran potencial para modificar las propiedades de muchos productos, además de un incremento de temperatura que podría llevar a una esterilidad comercial de los alimentos tratados (Martínez-Monteagudo, Yan & Balasubramaniam, 2016).

Por otro lado, los últimos avances tecnológicos permiten el uso de nuevos materiales y diseños de equipos que mejoran el rendimiento (Velázquez-Estrada et al., 2011) y, junto con una adecuada elección de la temperatura inicial, la presión y la geometría del equipo, esta tecnología se puede adecuar a los requerimientos de la industria (emulsificación, estructuración, pasteurización, aumento de vida útil, esterilización) (Martínez-Monteagudo, Yan & Balasubramaniam, 2016).

## 2.2. MICROFLUIDIZACIÓN

La microfluidización es una tecnología emergente basada en la homogeneización por altas presiones que consiste, a diferencia de la válvula utilizada en la homogeneización, en hacer pasar un fluido a gran velocidad por una cámara de tratamiento con microcanales, lo cual provoca un esfuerzo cortante elevado, fuerzas de impacto y de cavitación. Esto lleva a una reducción del tamaño de partícula en sólidos dispersos en el líquido, así como a una transformación de la microestructura, que modifica las

propiedades funcionales del alimento tratado (He et al., 2016; Leyva-Daniel et al., 2019; Ortiz de Erive et al., 2019). Se ha comprobado que dichos cambios llevan a un incremento de la actividad antioxidante, de las propiedades de hidratación y de la bioaccesibilidad de ciertos nutrientes (Wang et al., 2013; Wang et al., 2014). En función de la presión aplicada y el número de pases, se produce una reducción del tamaño de partícula y un aumento de la porosidad de las mismas, lo cual da lugar a unas modificaciones distintas en el producto, por lo que se deben ajustar las condiciones del tratamiento en función tanto del coste como de los efectos buscados (He et al., 2016).

En cuanto al equipo utilizado (Figura 2), el microfluidizador se considera un mezclador mecánico mixto que es un generador de altas presiones o bomba unido a una válvula.

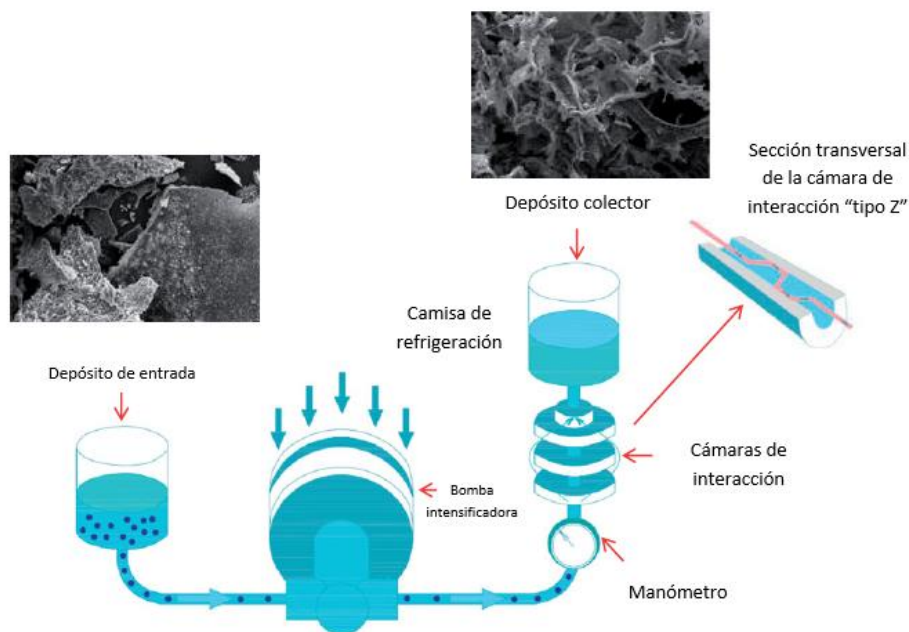


Figura 2. Representación de un microfluidizador (Figura adaptada de Mert, (2019)).

Estos equipos se diferencian de los homogeneizadores tradicionales en el tipo de bomba utilizada (el microfluidizador utiliza una bomba neumática que oscila en dos movimientos, uno de succión y otro de compresión), en la presión que alcanza ((5-50MPa frente a 200-600MPa del microfluidizador) y en la válvula, que se reemplaza por una cámara de interacción, tal como se muestra en la Figura 3.

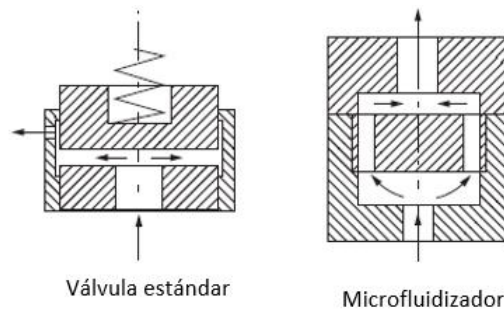


Figura 3. Válvula de homogeneización vs cámara de interacción (Figura adaptada de Villalobos-Castillejos et al., (2018)).

Esta cámara crea un flujo turbulento, favorece la disipación de energía y, gracias a su geometría fija, proporciona una presión uniforme, de modo que se obtiene un tamaño y distribución de partícula mucho más preciso (Villalobos-Castillejos et al., 2018).

Como se muestra en la Figura 4, existen dos tipos de cámaras de interacción: la cámara “tipo Y”, normalmente utilizada para el procesamiento de dispersiones líquido-líquido (emulsiones, liposomas...), y la cámara “tipo Z”, que se usa en dispersiones sólidas (Mert, 2019).

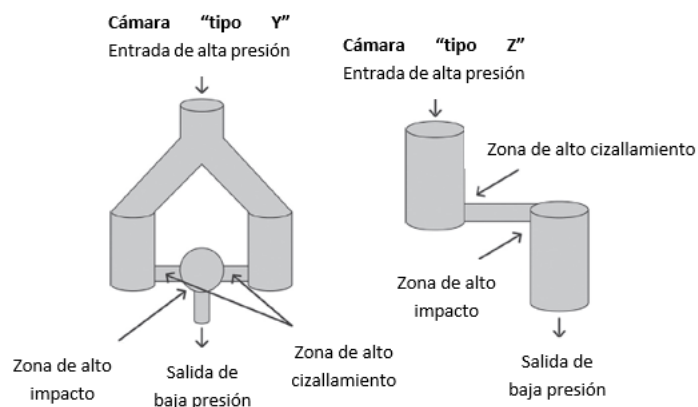


Figura 4. Cámaras de interacción “tipo Y” y “tipo Z” (Figura adaptada de Villalobos-Castillejos et al., (2018)).

### 2.3. INTERÉS DE LA HOMOGENEIZACIÓN DE ALTAS PRESIONES EN HARINAS

Actualmente se está estudiando la influencia que tiene la homogeneización por altas presiones sobre cereales, pseudocereales y leguminosas. Se busca conocer el efecto que estas producen en los componentes y propiedades de los mismos, así como en la seguridad microbiológica y vida útil de los productos finales (Mert, 2019). En relación con esto, el tratamiento de homogeneización por altas presiones ha demostrado mejorar las propiedades fisicoquímicas y la actividad antioxidante de dichos productos por su

influencia en la microestructura de los mismos (He et al., 2016). Estos tratamientos se suelen aplicar a la mejora de cremas, salsas y otros preparados (tofu, texturizados de soja, pan sin gluten) en cuya formulación se incluyen las harinas de cereales o leguminosas, o alguno de sus componentes. En consecuencia, es necesario conocer el efecto del tratamiento sobre ellos, tanto a nivel funcional como nutricional.

### **3. EFECTO DE LAS ALTAS PRESIONES EN LAS PROTEÍNAS**

Las proteínas de los alimentos son biopolímeros con numerosas funciones estructurales y funcionales, que influyen en el color, textura, aroma y perfil nutricional de los alimentos en los que están presentes (Guo et al., 2020). Además, participan en interacciones con otros compuestos (polisacáridos, y polifenoles), con lo que influyen en las características texturales y estructurales de algunos alimentos (Jin et al., 2020).

En los estudios realizados sobre el efecto de la homogeneización por altas presiones en proteínas, se ha visto que las altas presiones afectaban a la conformación de las proteínas y que provocan una desnaturalización, agregación o gelificación, debido a su acción sobre los enlaces no covalentes (Apichartsragkoon & Ledward, 2002; Adjei-Fremah et al., 2019). En un estudio con proteínas de soja, Liu & Kuo (2016) observaron que el fenómeno de cavitación, el cizallamiento elevado, la turbulencia o el impacto producidos por la elevada fuerza del tratamiento por homogeneización con altas presiones afectaban a la conformación macromolecular de las proteínas. En general, la estructura cuaternaria y ternaria se vio afectada, ya que el tratamiento aplicado provocaba disociaciones y agregaciones de las subunidades proteicas. Adjei-Fremah et al. (2019) observó que, en el caso de la estructura ternaria, se produjeron disrupciones de los dominios hidrofóbicos debido a la microfluidización, lo que alteró la conformación original. Del mismo modo, otros estudios demostraron que la estructura secundaria resultó alterada al aplicar presiones muy elevadas, lo que dio lugar a una desnaturalización irreversible de la molécula, pero en ningún caso afectó a la estructura primaria (Apichartsragkoon & Ledward, 2002; MuneMune et al., 2020; Guo et al., 2020). Se ha comprobado que el cambio de las propiedades físicas de las proteínas por microfluidización está relacionado principalmente con la presión aplicada, aunque también con el número de pases que se realizan (Liu et al., 2013; Liu & Kuo, 2016; Adjei-Fremah et al., 2019; Guo et al., 2020).

Estos cambios conformacionales están estrechamente relacionados con las propiedades funcionales y fisicoquímicas de las proteínas, como observó MuneMune et al. (2020) con proteínas de judías de bambara. Este autor observó que el tratamiento (100-150MPa) era capaz de incrementar la solubilidad, la hidrofobicidad superficial, los



puentes disulfuro y la capacidad emulsificante de las proteínas. Esto ya había sido observado anteriormente en aislados de proteína de soja (Shen & Tang, 2012; Liu et al., 2013; Liu & Kuo, 2016), una de las proteínas sobre la que hay más estudios disponibles con relación al efecto de la homogenización de las altas presiones sobre las mismas, posiblemente por sus propiedades nutricionales y funcionales. Sin embargo, esta proteína presenta una serie de limitaciones, sobre todo debido a su baja solubilidad, por lo que se han centrado los esfuerzos en desarrollar un tratamiento para solucionarlo (Shen & Tang, 2012). En un principio, se probó a aplicar altas presiones estáticas para la modificación de las propiedades de dichas proteínas (Apichartsrangkoon, 2003; Tang & Ma, 2009; Zhang et al., 2010). Los estudios realizados más recientemente mostraron que la aplicación de altas presiones reducía de forma más efectiva el tamaño de partícula y facilitaba la formación de una estructura homogénea tras la aplicación de las proteínas modificadas para la elaboración de tofu, con una menor sinéresis (Liu et al., 2013). Se observó que, en estos casos, la coagulación de las proteínas inducida por altas presiones o por tratamiento térmico ocurría de forma diferente a la tradicional coagulación con protones o iones calcio, ya que las tratadas por altas presiones presentan un menor grado de desnaturalización y una mayor superficie activa para las interacciones intermoleculares (Huang & Kuo, 2015). Junto con ello, se vio que, además de producirse una desnaturalización de las proteínas bajo presión, se originaba una reorganización aleatoria de las proteínas, dando lugar a una fracción insoluble de las mismas (Liu & Kuo, 2016), probablemente favorecida por los cambios de conformación e hidrofobicidad de las proteínas tratadas (Shen & Tang, 2012).

Aunque, como ya se ha comentado, la proteína más estudiada es la soja, también existen estudios sobre otras proteínas, como es el caso de la zeína, proteína predominante del maíz (Sun et al., 2015; Ozturk & Mert, 2018a). La zeína es un tipo de prolamina de naturaleza hidrofóbica soluble en alcohol que contiene un elevado número de residuos de aminoácidos hidrofóbicos como leucina, prolina, alanina y fenilalanina (Ozturk & Mert, 2017; Ozturk & Mert 2018a; Ozturk & Mert 2018b; Mert, 2019). Al ser una molécula hidrofóbica, es capaz de auto ensamblarse para formar diferentes estructuras, además de presentar una baja absorción de agua y buena textura, lo cual facilita su aplicación en la formación de coberturas (Dahiya et al., 2018). Cuando esta proteína se somete a un proceso de microfluidización, se ha observado una modificación de su estructura hidrofóbica, que mejora las propiedades físicas de la harina (aumenta su capacidad de hidratación), y un aumento de los poros y cavidades en la estructura, lo cual, según Ozturk & Mert, (2017) puede ser interesante para mejorar las propiedades reológicas y texturales de panes sin gluten, ya que disminuye la dureza y aumenta la

elasticidad y cohesividad de la masa (Ozturk & Mert, 2017), además de constituir un aporte extra de proteínas en los panes a los que se incorpora (Ozturk & Mert 2018b). Por otro lado, la microfluidización incrementó la estabilidad térmica de la zeína, lo cual permite el futuro desarrollo de nuevas aplicaciones, por ejemplo, en el desarrollo de biopolímeros (Sun et al., 2015).

#### **4. EFECTO DE LAS ALTAS PRESIONES EN EL ALMIDÓN**

El almidón, principal carbohidrato de reserva en plantas y una de las mayores fuentes de energía para el ser humano, (Leite et al., 2016; Ji, 2017; Shen et al., 2017; Li et al., 2018; Liu et al., 2019) es una materia prima que ha sido ampliamente utilizada en la industria alimentaria como espesante, gelificante o estabilizante (Leite et al., 2016; Li et al., 2018; Ahmed et al., 2018; Guo et al., 2020; He et al., 2020), además de ser el principal componente de las harinas estudiadas.

En general, sus propiedades fisicoquímicas y, por tanto, sus aplicaciones dependen de varios factores, entre los que destacan el ratio amilosa/amilopectina, el tamaño de gránulo, la forma, el grado de polimerización y las diferencias entre las regiones amorfas y cristalinas, junto con su origen botánico (Leite et al., 2016).

Normalmente, el almidón, según la caracterización nutricional, se clasifica en almidón rápidamente digerible (digerido y absorbido con rapidez), almidón lentamente digerible (supone un aporte prolongado de energía) y almidón resistente (Liu et al., 2019; Apostolidis & Mandala, 2020). El almidón resistente tiene un papel importante en la salud humana (Augustin et al., 2008), ya que es fermentado por las bacterias intestinales, por lo que se considera fibra fermentable. Además, en los últimos años ha despertado un especial interés, pues ha sido considerado probiótico (Apostolidis & Mandala, 2020).

En su forma nativa, el almidón presenta una serie de desventajas entre las que destacan la baja resistencia al cizallamiento, baja solubilidad, tendencia a la retrogradación y baja capacidad de formación de películas (Oyeyinka et al., 2016; Duan et al., 2017; Li et al., 2018; He et al., 2020). Esto hace, en algunos casos, necesaria su modificación para mejorar sus propiedades funcionales y adaptarlo a las necesidades de la industria (Oyeyinka et al., 2016; Guo et al., 2020). Para ello, desde hace unos años, como alternativa a los tradicionales tratamientos químicos, físicos o enzimáticos, se ha probado a aplicar tratamientos de homogeneización por altas presiones, puesto que han demostrado ser capaces de modificar las propiedades de hidratación y la viscosidad, así como de disminuir la temperatura de gelatinización de los almidones (Guo et al., 2020).

Normalmente, la aplicación de las altas presiones en almidones busca aportar nuevas propiedades funcionales o desarrollar nuevos productos (Wei et al., 2017; Apostolidis & Mandala, 2020), pero en algunas ocasiones también se persigue reducir la retrogradación o lograr una gelatinización no térmica, con menor tendencia a la retrogradación (Wang et al., 2017), es decir, en general, incrementar su rango de utilización (Leite et al., 2016).

En base a esto, se han realizado numerosos estudios sobre el efecto de dicha tecnología en almidones de diversas procedencias (maíz, arroz, trigo, patata, bambara, guisante, garbanzo, lenteja, etc). En todos ellos, el almidón fue sometido a una gran energía por masa de producto, con lo que se consiguió que las altas presiones no solo influyeran en la estructura y propiedades físicas de la materia prima, sino que produjeran una modificación de la cantidad y calidad de las moléculas de amilosa y amilopectina del producto final (Oyeyinka et al., 2016; Wang et al., 2017; Wei et al., 2017; Liu et al., 2019). Para ello se debe tener en cuenta que el impacto del proceso varía en función del tipo de almidón tratado, la presión aplicada, el número de ciclos, la temperatura, el tiempo y el contenido de humedad (Li et al., 2011, 2012; Wei et al., 2017).

Estos estudios observaron una disrupción de los gránulos de almidón, de modo que se obtuvo una distribución bimodal en las muestras tratadas, es decir, aparecieron dos tamaños de partícula diferentes, especialmente al aplicar presiones más elevadas (600MPa) (Wei et al., 2017; Ahmed et al., 2018; He et al., 2020). Se cree que esto se debió a que el almidón dañado por las altas presiones tiende a formar aglomerados con otras partículas de almidón de pequeño tamaño, formando agregados de mayor tamaño de partícula (Li et al., 2012; Li et al., 2018; Ahmed et al., 2018; Liu et al., 2019).

En cuanto a la estructura, estos estudios demostraron que las altas presiones modificaron significativamente la apariencia superficial de los gránulos, ya que provocaron la ruptura de los más grandes en partículas irregulares más pequeñas, perdiendo la morfología original como se muestra en la Figura 5 (Shahbazi et al., 2018; Li et al., 2018), además de provocar una pérdida de la estructura cristalina conforme aumentaba la presión aplicada (Wang et al., 2017; Liu et al., 2019; He et al., 2020; Apostolidis & Mandala, 2020).

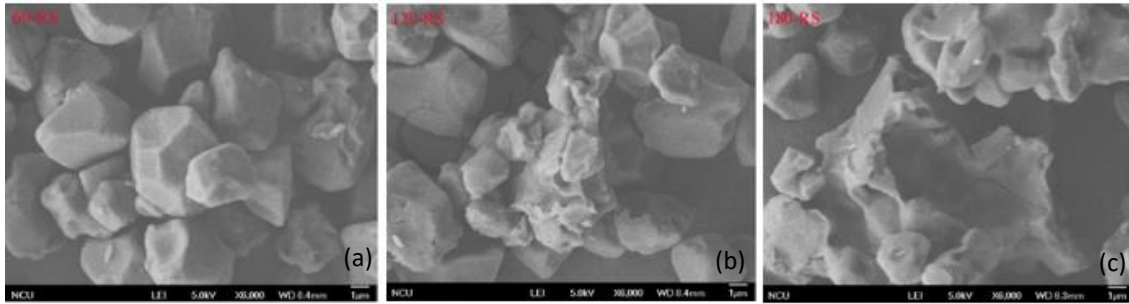


Figura 5. Almidón nativo de arroz (a) frente a almidones de arroz sometidos a altas presiones (b) y (c) (Figura adaptada de Li et al., (2018))

Se observó que, a presiones bajas (200-300MPa), se producían deformaciones y grietas en la superficie; a presión intermedia (400MPa), comenzaba a darse una coalescencia de los gránulos; y a presiones elevadas (600MPa) se daba una disrupción casi completa de su morfología (Wang et al., 2017; Shen et al. 2017; Apostolidis & Mandala, 2020), con lo que se concluyó que los daños en los gránulos eran mayores cuanto más presión se utilizaba (He et al., 2020; Apostolidis & Mandala, 2020). La mayoría de los estudios coinciden, por tanto, en que el factor que más influye en las propiedades es la presión aplicada, aunque el número de ciclos también tiene un efecto significativo (a mayor número de ciclos, mayor rotura) (Tu et al., 2013; Duan et al., 2017; Wei et al., 2017; Wang et al., 2018; Guo et al., 2020; De Bondt et al., 2020).

Por otro lado, la elevada cantidad de almidón dañado, después de sufrir un tratamiento de homogeneización por altas presiones, dio lugar a una disminución de la viscosidad aparente (Wang et al., 2012; Wang et al., 2017; Li et al., 2018; Bitik et al., 2019) y también llevó a un incremento de la capacidad de hidratación y retención de agua de los almidones (Santos et al., 2014; Ahmed et al., 2018; Wang et al., 2018; Bitik et al., 2019).

Se observó, además, que las altas presiones eran capaces de producir una gelatinización en frío del almidón, en función de los ratios de amilosa/amilopectina (Leite et al., 2016; Ji et al., 2017; Guo et al., 2020) y del incremento de presión aplicada. Se vio que, a mayor presión, mayor capacidad de absorción y retención de agua y mayor tamaño de los gránulos de almidón por agregación de partículas de pequeño tamaño debido a la presión (He et al., 2020). Al provocar la entrada de moléculas de agua dentro del gránulo, las altas presiones promovieron una hidratación del almidón sin calentamiento lo que, a presión muy elevada (600Mpa), llevó a una gelatinización completa (Leite et al., 2016).

Las variaciones en el grado de gelatinización observado en los diferentes estudios pueden atribuirse al contenido de amilosa del gránulo. Comparando muestras de

diferente origen botánico (arroz, arroz ceroso, maíz, maíz ceroso, tapioca y patata) la gelatinización fue mayor en las muestras de menor contenido en amilosa (Oh et al., 2008). Esto se debe a que, tras la aplicación del tratamiento de homogenización por altas presiones, se hidrataron en primer lugar las regiones amorfas, dando lugar a un hinchamiento que promovió la distorsión y destrucción de las regiones cristalinas. Una vez destruidas, dichas regiones resultaron más sensibles a las altas presiones, completándose el proceso de gelatinización y siendo, por tanto, más accesibles al agua (Leite et al., 2016). Además de todo ello, las propiedades térmicas de los almidones también se vieron afectadas por el tratamiento (Shahbazi et al., 2017). Las temperaturas de gelatinización disminuyeron (el almidón se ha pregelatinizado en el proceso) y la entalpía de gelatinización, es decir, la energía requerida para fundir las estructuras helicoidales y cristalinas de los gránulos, también se vio reducida conforme aumentaba la presión aplicada (He et al., 2020). En cuanto a la retrogradación de los almidones tratados, se comprobó que el efecto de las altas presiones variaba en función del tipo y la concentración del almidón y de las condiciones del tratamiento (Wang et al., 2017), aunque en general, tendían a incrementarla (He et al., 2020). Como consecuencia de todo ello, la reología de las muestras tratadas también varió, pues el almidón modificado alteraba la alineación de las cadenas y cambiaba la formación de la red de gel, mejorando la estabilidad y reduciendo la sinéresis del producto final (Oyeyinka et al., 2016).

Por último, dado el interés que despierta el almidón resistente, se han realizado una serie de estudios centrados en él. En primer lugar, se determinó que, a pesar de las ventajas fisiológicas que aporta, en su forma nativa su funcionalidad física resultaba un problema, pues carecen de capacidad de retención de agua y no son capaces de espesar o formar geles (Augustin et al., 2008). La resistencia de este tipo de almidón a la digestión se debe a su elevado contenido en amilosa (70%) frente al almidón normal que posee un 20-30%, lo cual hace que posea una estructura semicristalina y una gran resistencia a la hidrólisis enzimática (Shen et al., 2017). En este caso se buscaba una modificación de las estructuras y propiedades para adaptarlo a las aplicaciones industriales (Apostolidis & Mandala 2020). Dado que durante el tratamiento se produjo una reorganización del contenido de amilosa y amilopectina en el gránulo (Apostolidis & Mandala, 2020), esta podría contribuir a una mejor digestibilidad del almidón, ya que se forma una estructura menos organizada y más susceptible a la hidrólisis enzimática (Shen et al., 2017). En conjunto, el tratamiento con altas presiones logró una modificación estructural del almidón resistente, incrementando su digestibilidad, capacidad de retención de agua y de espesamiento, y haciéndolo más adecuado para

su aplicación en formulaciones beneficiosas para el sistema digestivo (Augustin et al., 2008; Shen et al., 2017).

## **5. EFECTO DE LAS ALTAS PRESIONES EN LA FIBRA**

La fibra dietética (FD) atrae cada vez más atención de investigadores de todo el mundo, ya que se considera un componente de los alimentos con interés nutricional pues aporta una serie de beneficios para la salud, y ayuda a prevenir numerosas patologías (Champ et al., 2003). Existen dos tipos principales de fibra dietética: fibra dietética soluble (FDS) y fibra dietética insoluble (FDI) (Liu et al., 2016), cada una con sus respectivas funciones y beneficios nutricionales. La fracción soluble tiene carácter prebiótico, participa en la reducción del colesterol y en procesos antiinflamatorios del aparato digestivo, mientras que la fracción insoluble mejora el proceso digestivo, reduciendo el tiempo de tránsito de los alimentos (Tu et al., 2012; Guo et al., 2020). Además de ello, se ha visto que la fibra dietética presenta una gran capacidad para combinarse con metales pesados como plomo, mercurio, cadmio y níquel (Mert, 2019; Guo et al., 2020). Debido a esto, es importante un aporte equilibrado de ambas fracciones para obtener los beneficios de ambas. El ratio adecuado es de 30-50% de soluble y 50-70% de insoluble, aunque en muchos alimentos se incorpora principalmente FDS ya que la adición de fibra insoluble puede dar lugar a alteraciones sensoriales y funcionales no deseadas, como modificaciones del color, la textura, la vida útil o el volumen final (Demirkesen et al., 2010; Tu et al., 2012). Por ello es necesario modificar las propiedades de la fibra para evitar estos perjuicios del producto final (Guo et al., 2020).

Se ha visto que, al aplicar esta tecnología sobre la fibra, se consigue una disminución del tamaño de partícula y una apertura de la microestructura de las partículas sólidas, con lo que se logra un incremento de sus propiedades saludables (actividad antioxidante, bioaccesibilidad) (Wang et al., 2013; Wang et al., 2014; Suriano et al., 2018). Morales-Medina et al., (2020) comprobaron que la clave para determinar la composición y funcionalidad de la fibra era la distribución del tamaño de partícula. La celulosa posee una estructura organizada en varios niveles (molécula de celulosa, fibrillas elementales, micro y macrofibrillas), de modo que, durante la microfluidización, se degradaron en las unidades más sencillas, con lo que disminuyó el tamaño de partícula de la fibra (Morales-Medina et al., 2020). Esto se traduce en la posibilidad de obtener los mismos beneficios con una menor cantidad de fibra añadida al producto final y en una reducción de los efectos negativos sobre las propiedades sensoriales, que lleva a una mayor aceptabilidad por el consumidor (Ortiz de Erive et al., 2019; Mert, 2019).

Los primeros estudios disponibles sobre la aplicación de microfluidización por altas presiones en fibra se centraron en la fibra procedente de los subproductos de la soja (Tu et al., 2012), una materia prima muy apreciada que, en su procesado, da lugar a una gran cantidad de residuos ricos en nutrientes que, por lo general, son descartados para alimentación animal. El tratamiento de estos subproductos puede resultar muy útil, no solo por la reducción de desechos, sino por su interés nutricional y funcional, dado su aporte de fibra dietética. (Tu et al., 2012)

Tu et al. (2014), investigaron el efecto de esta tecnología sobre la fibra. En este estudio se comprobó que la microfluidización no afectó al contenido en fibra dietética total (FDT) pero sí produjo una variación en las proporciones ya que incrementó la FDS y redujo la FDI. En estudios posteriores se confirmó que la microfluidización es capaz de modificar las fracciones insolubles para hacerlas solubles (Wang et al., 2018).

Además de esto, se determinó que la combinación de fuerzas producidas por la tecnología de microfluidización podría ser la responsable de la rotura de los enlaces débiles entre polisacáridos, lo que lleva a una degradación parcial de la celulosa y hemicelulosa. En base a ello, se analizó el efecto en ambas macromoléculas, de lo que se deduce que la hemicelulosa es la que más afectada resulta por el tratamiento, especialmente al ser sometida a presiones más elevadas (200 MPa) (Tu et al., 2012).

Por otro lado, el tratamiento también afectó a la topografía superficial de la fibra, ya que provocó la aparición de laceraciones y roturas que permitieron ver el interior fibroso (Figura 6).

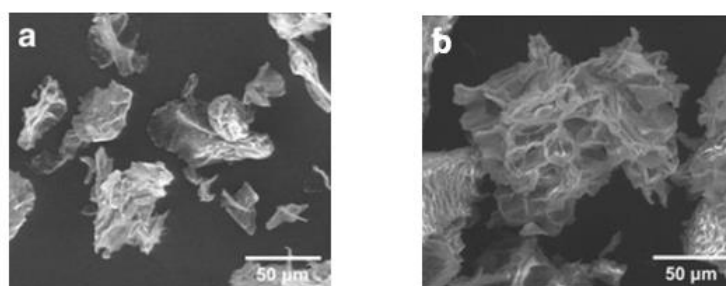


Figura 6. Fibra original (a) frente a fibra tratada a 200MPa (b) (Figura adaptada de Tu et al., (2012))

Así mismo, se observó que, conforme aumentaba la presión, también lo hacía la cristalinidad de la muestra, de lo que se deduce que la microfluidización no daña las regiones cristalinas de la fibra (Tu et al., 2012). Por otro lado, se sabe que el índice de cristalinidad de la celulosa influye en la capacidad de retención de agua (WHC) de las

suspensiones de fibra y que el tratamiento con altas presiones puede incrementar dicha cristalinidad (Taheri & Samyn, 2016), y así mejorar la capacidad de retención de agua (Morales-Medina et al., 2020). En relación con esto, se ha comprobado que la presión aplicada y, especialmente, el número de pases afecta al tamaño de partícula y al área superficial (He et al., 2016). Se sabe que la capacidad de hidratación de una fibra lleva a un mayor efecto de saciedad y un incremento del bolo fecal (He et al., 2016) y que dicha propiedad está estrechamente relacionada con el tamaño de partícula, el área superficial, la porosidad y la microestructura de la matriz, por lo que, al verse modificados por el tratamiento, la WHC también se modifica (Liu et al., 2016). En estudios previos se había asociado el incremento de WHC con una disminución del tamaño de partícula en muestras de salvado de trigo microfluidizadas (Wang, Sun, Zhou, & Chen, 2012), lo cual fue corroborado posteriormente por Liu et al. (2016), que observó un incremento de dicha capacidad con la reducción del tamaño de partícula. Así mismo, se vio una aparición de poros, lo cual llevó a un aumento del área superficial y proporcionó un mayor número de grupos polares y sitios de unión para las moléculas de agua, incrementando la absorción y retención de la misma. (Liu et al., 2016). No obstante, Morales-Medina et al. (2020), al analizar muestras de fibra de guisante por el mismo procedimiento, destacó que solo se produjo una ligera variación de los valores de WHC, sobre todo en las suspensiones con mayor tamaño de partícula (Morales-Medina et al., 2020).

Liu et al. (2016) profundizó en el tema, analizando los efectos de la microfluidización en las propiedades fisicoquímicas de la fracción de fibra insoluble. En primer lugar, evaluó el efecto sobre el tamaño de partícula, y comprobó que, conforme aumenta la presión aplicada, el tamaño disminuye considerablemente debido a la ruptura de las partículas por el esfuerzo cortante durante el tratamiento (Liu et al., 2016). En cuanto a la distribución de las fracciones, se observó que, en las suspensiones con un tamaño de partícula superior a 80  $\mu\text{m}$ , la presión aplicada durante el tratamiento fue suficiente para romper las interacciones electrostáticas, e hizo que se lograra una mayor desfibrilación de las microfibrillas; pero la fibra insoluble no se vio afectada, por lo que la energía no fue suficiente para lograr una desfibrilación completa. No obstante, en el caso de las suspensiones con un tamaño de 60  $\mu\text{m}$ , la desfibrilación fue total, y se produjo además una disminución de la fracción insoluble, de lo que se dedujo que la energía fue la suficiente para romper los enlaces glicosídicos (Morales-Medina et al., 2020). Sin embargo, también se vio que, a presiones elevadas, se produce un ligero incremento del tamaño de partícula, asociado a una posible reagrupación de partículas debido a las fuerzas de van der Waals y la atracción electrostática presente en la superficie de las



mismas (Liu et al., 2016). Del mismo modo, se observó el efecto en la microestructura de la fibra insoluble, y se comprobó que esta se ve más alterada conforme mayor es la presión aplicada, lo cual, en las muestras estudiadas, llevó a la aparición de poros o cavidades en el interior, pero sin afectar a la estructura primaria de la fibra (Guo et al., 2020).

Los últimos estudios relacionados con el efecto de las altas presiones sobre la fibra se centran en el aprovechamiento de la cáscara de guisante, como fuente de fibra dietética (Morales-Medina et al., 2020). Este material en sí posee unas propiedades funcionales no deseadas (p.e. baja capacidad de retención de agua, textura y consistencia desagradables) y puede dar características negativas al alimento al que se añaden. Por ejemplo, las características de la cáscara de guisante están estrechamente relacionadas con la estructura de los polisacáridos de su pared celular, que forman una matriz fuerte y muy cohesionada, compuesta principalmente por celulosas, hemicelulosas y pectinas (Nechyporchuk & Belgacem, 2016). En base a esto, se planteó llevar a cabo una desfibrilación de los polisacáridos haciendo uso de la homogenización por altas presiones, ya que una disminución del tamaño de partícula lleva a una mejora las propiedades funcionales de la fibra (Morales-Medina et al., 2020). En estudios previos se había realizado una reducción de tamaño por homogeneización con altas presiones en medio acuoso, lo cual mejoró notablemente las propiedades de hidratación de la celulosa (Rezayati Charani et al., 2013).

En paralelo a esto, se estudió el efecto de la microfluidización sobre otros tipos de fibras como son las pectinas, heteropolisacáridos complejos presentes en las paredes vegetales de la mayoría de plantas (Chen et al., 2012), dado que estaban presentes en alguna de las materias primas utilizadas (Nechyporchuk & Belgacem, 2016). Normalmente esas fibras son utilizadas como gelificantes y espesantes, pero presentan problemas de estabilidad al procesado, ya que tienden a degradarse al ser sometidas a ciertos tratamientos fisicoquímicos. Por ello, se ha estudiado el efecto de tecnologías emergentes como la microfluidización sobre las pectinas, ya que, en estudios previos, dicho efecto se atribuía a degradación mecánica por combinación de las diferentes fuerzas aplicadas en el proceso (Chen et al., 2011). En lo referente al flujo, se vio que disminuía la viscosidad aparente y el compuesto adquiría un comportamiento Newtoniano. Además, el índice de consistencia disminuyó, mientras que el índice de flujo incrementó conforme aumentaba la presión aplicada, lo cual evidenciaba que tenía un menor comportamiento pseudoplástico (Chen et al., 2012). Al evaluar la reología y estabilidad de las muestras, Morales-Medina et al. (2020) dedujo que las macrofibrillas y microfibrillas interaccionan electrostáticamente dando lugar a una red compacta pero

elástica. La aplicación de microfluidización dio lugar a un incremento de temperatura que mejoró la elasticidad de la red y, por otro lado, la desfibrilación provocada por el tratamiento dio lugar a una estructura con mayor resistencia al flujo y mayor viscosidad (Morales-Medina et al., 2020). Por otro lado, el peso molecular de la pectina también se vio afectado en función de la presión aplicada, debido a la ruptura de enlaces covalentes de la cadena polimérica. En tratamientos por debajo de 40MPa, no se observó variación en el contenido de azúcares, por lo que el cambio de viscosidad y de peso molecular se debió principalmente a una agregación molecular. Sin embargo, al aplicar presiones más elevadas, se vio un incremento de los azúcares reductores (Chen et al., 2012). Respecto al tamaño de partícula y la morfología de superficie, al igual que ocurría en los estudios anteriores, el incremento de presión llevó a una disminución del tamaño de partícula y la aparición de poros, que causaban la ruptura de las moléculas en pequeños segmentos (Chen et al., 2012; Guo et al., 2020).

Como conclusión de todo ello, la microfluidización resultó ser una técnica muy efectiva para modificar tanto la estructura como las propiedades nutricionales y funcionales de la fibra de diferentes orígenes, lo cual da lugar a ingredientes funcionales de gran interés en la industria alimentaria.

## **6. EFECTO EN HARINAS**

Las altas presiones han demostrado ser capaces de modificar las propiedades funcionales de las macromoléculas que forman parte de las harinas, sobre todo alterando la estructura de los almidones y de las proteínas y enzimas (Barba et al., 2015), como ya se ha mencionado previamente en esta revisión.

Se debe tener en cuenta que el efecto de las altas presiones varía en función del tipo y concentración de harina tratada, del tiempo, la temperatura y la presión aplicada (Alvarez et al., 2014). Las altas presiones presentan una alternativa interesante en la modificación de las harinas de cereales sin gluten para lograr una mejora en sus cualidades de panificación (Vallons & Arendt, 2009). Estudios previos demostraron los beneficios del almidón pregelatinizado en la retención de agua, la capacidad de retención de gas de la masa y el incremento de la vida útil del producto (Vallons et al., 2010b). Por otro lado, el tratamiento determinó la formación de geles con una estructura menos rígida (Cappa et al., 2016), con mayor suavidad y resistencia a la deformación (Vallons et al., 2010a).

Los estudios disponibles se centran mayoritariamente en la posibilidad de modificar las propiedades de las harinas utilizadas para elaborar panes sin gluten con el objetivo de

mejorar su aceptabilidad y características, tanto a nivel tecnológico (textura, retención de gas, de humedad) como sensorial (apariencia, sabor y aroma, masticabilidad...) (Vallons et al., 2010a; Vallons et al., 2010b; Cappa et al., 2016). Dichos panes se elaboran orientados al colectivo celiaco que, debido a su condición, debe evitar el consumo de gluten durante toda su vida (Vallons et al., 2010a; Cappa et al., 2016). Las materias primas empleadas para ello (alforfón, arroz blanco y teff), aunque están libres de gluten, presentan características tecnológicas más pobres, puesto que no poseen las propiedades viscoelásticas necesarias para formar una red capaz de retener el gas de la fermentación, lo cual da lugar a panes con peor textura, menor volumen y suavidad, y una rápida retrogradación (Vallons et al., 2010b; Cappa et al., 2016). Además de ello, la presión induce la modificación de las proteínas, con lo que lleva a cambios estructurales que mejoran las características organolépticas del producto final (Vallons et al., 2010b). En algunas muestras tratadas se observó una menor actividad de agua, ya que aparecía unida a los componentes de la masa, lo cual tenía un efecto positivo en la textura y, sobre todo, en la conservación del producto (Cappa et al., 2016), con lo que se demostraba que el tratamiento con altas presiones resulta efectivo para retrasar el endurecimiento del pan sin gluten (Hüttner et al., 2010).

A parte de esto, se han realizado investigaciones sobre los efectos de las altas presiones en otras harinas como las de arroz o el trigo, para conocer en mayor profundidad el efecto que tienen sobre su comportamiento viscoelástico (Ahmed et al., 2007) o en la mejora de las propiedades sensoriales de los productos en los que se emplean (Wang et al., 2020).

En general, en todos los casos, se estudió la variación de la microestructura, confirmando los resultados de los artículos anteriores, dado que en algunos de ellos se produjo un incremento del tamaño de partícula, debido a una agregación causada por el aumento de presión (Wang et al., 2020). Los gránulos de almidón se vieron más afectados conforme se aplicaba una presión más elevada y así mismo, la viscosidad aumentó (McCann et al., 1013).

## **7. CONCLUSIONES**

A lo largo de la revisión bibliográfica realizada se ha observado que, según las investigaciones disponibles, los tratamientos por altas presiones (homogeneización y microfluidización) son capaces de modificar las características de las harinas y las macromoléculas que las componen.

En cuanto a las proteínas, la presión lleva a un cambio conformacional (disminuye el tamaño de partícula y da una estructura más homogénea) y, por tanto, modifica las propiedades tecnológicas y organolépticas. Respecto al almidón, al tratarse del componente principal de las harinas, su modificación condiciona el comportamiento general de las harinas a nivel reológico del producto final. En este caso, las presiones alteran la estructura de los gránulos, hacen disminuir la viscosidad e incrementan la capacidad de hidratación y retención de agua, con lo que mejoran las propiedades de la harina e incrementan su rango de aplicación en la industria alimentaria (productos sin gluten). En el caso de la fibra, las altas presiones modifican de forma efectiva la estructura y las propiedades funcionales y nutricionales que posee, dando lugar a ingredientes de gran interés en la industria. Finalmente, en las harinas se ha comprobado que el tratamiento por altas presiones, al modificar la estructura y propiedades de las macromoléculas que las componen, favorece la obtención de harinas con unas características determinadas. Esto resulta muy útil en el caso de las obtenidas a partir de cereales sin gluten, ya que permite la elaboración de panes con mejores propiedades sensoriales, y una mayor aceptabilidad del producto final.

A nivel general, se ha comprobado que el factor principal del proceso es la intensidad de la presión aplicada, ya que a mayor presión mayor modificación de los componentes macromoleculares. Además de esto, se considera que también influye en gran medida el número de ciclos al que se somete el producto.

En vista de la información disponible, se podrían realizar estudios sobre el efecto de estas tecnologías en las enzimas presentes en las harinas, así como en otros componentes de interés nutricional como son los polifenoles. Por otro lado, también sería interesante ampliar los conocimientos del efecto de las altas presiones en la industria panaria, estudiando el impacto que tienen en las levaduras empleadas en ella.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

Adjei-Fremah, S., Worku, M., Ortiz De Erive, M., He, F., Wang, T. (2019) Effect of microfluidization on microstructure, protein profile and physicochemical properties of whole cowpea flours. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 57, 102207 <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102207>

Ahmed, J., Ramaswamy, H.S., Ayad, A., Alli, I., Alvarez, P. (2007) structural changes in Basmati rice flour slurry. *Journal of Cereal Science*, 46, 148–156 <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.01.006>

- Ahmed, J., Thomas, L., Arfat, Y.A., Joseph, A. (2018) Rheological, structural and functional properties of highpressure treated quinoa starch in dispersions. *Carbohydrate Polymers*, 197, 649-657. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.05.081>
- Akhmazillah M.F.N., Farid M.M., Silva F.V.M. (2013) High pressure processing (HPP) of honey for the improvement of nutritional value. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 20, 59-63. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.06.012>
- Alvarez, M.D., Fuentes, R., Olivares, M.D., & Canet, W. (2014). Effects of high hydrostatic pressure on rheological and thermal properties of chickpea (*Cicer arietinum* L.) flour slurry and heat-induced paste. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 21, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.11.005>
- Apichartsrangkoon, A., Ledward, D.A. (2002) Dynamic viscoelastic behaviour of high pressure treated gluten–soy mixtures. *Food Chemistry*, 77, 317–323. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00354-5](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00354-5)
- Apichartsrangkoon, A. (2003). Effects of high pressure on rheological properties of soy protein gels. *Food Chemistry*, 80, 55–60. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00235-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00235-2)
- Apostolidis, E., Mandala, I. (2020) Modification of resistant starch nanoparticles using high-pressure homogenization treatment, *Food Hydrocolloids*, 103, 105677. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105677>
- Augustin, M.A., Sanguansri, P., Htoon, A. (2008) Functional performance of a resistant starch ingredient modified using a microfluidiser. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9 (2), 224-231. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.11.003>
- Barba, F.J., Terefe, N.S., Buckow, R., Knorr, D., & Orlie, V. (2015). New opportunities and perspectives of high pressure treatment to improve health and safety attributes of foods. A review. *Food Research International*, 77, 725-742. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.05.015>
- Bitik, A., Sumnu, G., Oztop, M. (2019) Physicochemical and structural characterization of microfluidized and sonicated legume starches. *Food and Bioprocess Technology*. 12, 1144–1156 <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02264-4>

- Cappa, C., Barbosa-Cánovas, G.V., Lucisano, M., Mariotti, M. (2016) Effect of high pressure processing on the baking aptitude of corn starch and rice flour, *LWT - Food Science and Technology*, 73, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.05.028>
- Capuano, E. (2016) The behavior of dietary fiber in the gastrointestinal tract determines its physiological effect. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57 (16), 3543–3564. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1180501>
- Champ M., Langkilde A.M., Brouns F., Kettlitz B., Collet Y.L. (2003) Advances in dietary fibre characterisation. 1. Definition of dietary fibre, physiological relevance, health benefits and analytical aspects. *Nutrition Research Reviews*, 16(1), 71–82 <https://doi.org/10.1079/nrr200254>
- Chau, C.-F., Wang, Y.T., & Wen, Y.L. (2007). Different micronization methods significantly improve the functionality of carrot insoluble fibre. *Food Chemistry*, 100(4), 1402-1408. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.11.034>
- Chen, J., Liang, R.H., Liu, W., Liu, C.M., Li, T., Tu, Z.C., & Wan, J. (2012). Degradation of high-methoxyl pectin by dynamic high pressure microfluidization and its mechanism. *Food Hydrocolloids*, 28(1), 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.12.018>
- Chen, R. H., Huang, J. R., Tsai, M. L., Tseng, L. Z., & Hsu, C. H. (2011). Differences in degradation kinetics for sonolysis, microfluidization and shearing treatments of chitosan. *Polymer International*, 60(6), 897-902. <https://doi.org/10.1002/pi.3055>
- Dahiya, S., Rani, R., Dhingra, D., Kumar, S., & Dilbaghi, N. (2018) Conjugation of epigallocatechin gallate and piperine into a zein nanocarrier: Implication on antioxidant and anticancer potential. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 9 (3), 035011. <https://doi.org/10.1088/2043-6254/aad5c1>
- De Bondt, Y., Rosa-Sibakov, N., Liberloo, I., Roye, C., Van De Walle, D., Dewettinck, K., Goos, P., Nordlund, E., Courtin, C. M. (2020). Study into the effect of microfluidisation processing parameters on the physicochemical properties of wheat (*Triticum aestivum* L.) bran. *Food Chemistry*, 125436. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125436>
- Demirkesen, I., Mert, B., Sumnu, G., & Sahin, S. (2010) Utilization of chestnut flour in gluten-free bread formulations. *Journal of Food Engineering*, 101 (3), 329–336. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.07.017>.

- Duan, D., Tu, Z., Wang, H., Sha, X., & Zhu, X. (2017). Physicochemical and rheological properties of modified rice amylose by dynamic high-pressure microfluidization. *International Journal of Food Properties*, 20(4), 734-744. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1178283>
- Guo, X., Chen, M., Li, Y., Dai, T., Shuai, X., Chen, J., Liu, C. (2020) Modification of food macromolecules using dynamic high pressure microfluidization: A review, *Trends in Food Science & Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.004>.
- He, F., Wang, T., Zhu, S., Chen, G. (2016) Modeling the effects of microfluidization conditions on properties of corn bran, *Journal of Cereal Science*, 71, 86-92. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.08.002>
- He, X., Luo, S., Chen, M., Xia, W., Chen, J., Liu, C. (2020) Effect of industry-scale microfluidization on structural and physicochemical properties of potato starch. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 60, 102278. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102278>
- Huang, Y. C., & Kuo, M. I. (2015). Rheological characteristics and gelation of tofu made from ultra-high-pressure homogenized soymilk. *Journal of Texture Studies*. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12133>
- Hüttner, E.K., Dal Bello, F., & Arendt, E.K. (2010). Fundamental study on the effect of hydrostatic pressure treatment on the bread-making performance of oat flour. *European Food Research and Technology*, 230(6), 827-835. <https://doi.org/10.1007/s00217-010-1228-4>
- Ji, Y. (2017) In vitro digestion and physicochemical characteristics of corn starch mixed with amino acid modified by low pressure treatment, *Food Chemistry*, 242, 421-426. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.073>
- Ji, Z., Yu, L., Liu, H., Bao, X., Wang, Y., Chen, L. (2017) Effect of pressure with shear stress on gelatinization of starches with different amylose/amylopectin ratios. *Food Hydrocolloids*, 72, 331-337. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.06.015>
- Jin, B., Zhou, X., Zheng, Z., Liang, Y., Chen, S., Zhang, S., Li, Q. (2020) Investigating on the interaction behavior of soy protein hydrolysates/ $\beta$ -glucan/ferulic acid ternary complexes under high-technology in the food processing: High pressure homogenization versus microwave treatment. *International Journal of Biological Macromolecules* 150, 823–830 <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.138>

- Leite, T.S., T. De Jesus, A.L., Schmiele, M., Tribst, A.A.L., Cristianini, M. (2016) High pressure processing (HPP) of pea starch: Effect on the gelatinization properties. *LWT- Food Science and Technology*, 76, 361-369. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.07.036>
- Leyva-daniel, D.E., Alamilla-Beltrán, L., Villalobos-Castillejos, F., Monroy-Villagrana, A., Jiménez-Guzmán, J., Welti-Chanes, J. (2019) Microfluidization as a honey processing proposal to improve its functional quality, *Journal of Food Engineering*, 274, 109831. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109831>
- Li, W., Bai, Y., Mousaa, S. A., Zhang, Q., Shen, Q. (2012). Effect of high hydrostatic pressure on physicochemical and structural properties of rice starch. *Food and Bioprocess Technology*, 5(6), 2233-2241. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0542-6>
- Li, W., Zhang, F., Liu, P., Bai, Y., Gao, L., & Shen, Q. (2011). Effect of high hydrostatic pressure on physicochemical, thermal and morphological properties of mung bean (*Vigna radiata* L.) starch. *Journal of Food Engineering*, 103(4), 388-393. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.11.008>
- Li, Y., Wang, R., Liang, R., Chen, J., He, X., Chen, R., Liu, W., Liu C. (2018) Dynamic high-pressure microfluidization assisting octenyl succinic anhydride modification of rice starch. *Carbohydrate Polymers*, 193, 336-342. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.103>
- Liu, C., Liang, R., Dai, T., Ye, J., Zeng, Z., Luo, S., Chen, J. (2016) Effect of dynamic high pressure microfluidization modified insoluble dietary fiber on gelatinization and rheology of rice starch. *Food Hydrocolloids*, 57, 55-61. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.01.015>
- Liu, H. H., Chien, J. T., & Kuo, M. I. (2013). Ultra high pressure homogenized soy flour for tofu making. *Food Hydrocolloids*, 32, 278-285. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.01.005>
- Liu, H., Kuo, M. (2016) Ultra high pressure homogenization effect on the proteins in soy flour. *Food Hydrocolloids* 52, 741-748. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.08.018>
- Liu, Y., Chen, L., Xu, H., Liang, Y., Zheng, B. (2019) Understanding the digestibility of rice starch-gallic acid complexes formed by high pressure homogenization.



*International Journal of Biological Macromolecules*, 134, 856–863.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.083>

Martínez-Monteagudo, S. I., Yan, B., & Balasubramaniam, V. M. (2017). Engineering Process Characterization of High-Pressure Homogenization—from Laboratory to Industrial Scale. *Food Engineering Reviews*, 9, 143–169.  
<https://doi.org/10.1007/s12393-016-9151-5>

Mccann, T.H., Leder, A., Buckow, R., Day, L. (2013) Modification of structure and mixing properties of wheat flour through high-pressure processing. *Food Research International*, 53, 352–361 <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.04.030>

Mert, B. (2012). Using high pressure microfluidization to improve physical properties and lycopene content of ketchup type products. *Journal of Food Engineering*, 109 (3), 579–587. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.021>.

Mert, I.D. (2019): The applications of microfluidization in cereals and cereal-based products: An overview, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 60, 1007-1024. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1555134>

Mert, B., A. Tekin, I. Demirkesen, & G. Kocak. (2014). Production of microfluidized wheat bran fibers and evaluation as an ingredient in reduced flour bakery product. *Food and Bioprocess Technology*, 7 (10), 2889–2901. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1258-1>.

Morales-Medina, R., Dong, D., Schalow, S., Drusch, S. (2020) Impact of microfluidization on the microstructure and functional properties of pea hull fibre, *Food Hydrocolloids*, 105660. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105660>

Munemune, M.A., Stanciuc, N., grigore-Gurgu, L., Aprodu, I., Borda, D. (2020) Structural changes induced by high pressure processing in Bambara bean proteins at different pH. *LWT - Food Science and Technology* 124, 109187 <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109187>

Napolitano, A., Lanzuise, S., Ruocco, M., Arlotti, G., Ranieri, R., Knutsen, S. H., et al. (2006). Treatment of cereal products with a tailored preparation of Trichoderma enzymes increases the amount of soluble dietary fiber. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(20), 7863-7869. <https://doi.org/10.1021/jf0612777>

- Nechporchuk, O., & Belgacem, M. N. (2016). Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances. *Industrial Crops and Products*, 93, 2–25. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.016>
- Oh, H. E., Pinder, D. N., Hemar, Y., Anema, S. G., Wong, M. (2008). Effect of high-pressure treatment on various starch-in-water suspensions. *Food Hydrocolloids*, 22(1), 150-155. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.01.028>
- Ortiz de Erive, M., Wang, T., He, F., Chen, G. (2019) Development of high-fiber wheat bread using microfluidized corn bran, *Food Chemistry*, 310, 125921. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125921>
- Oyeyinka, S.S., Singh, S., Ma, Y., Amonsou, E.O. (2016) Influence of high-pressure homogenization on the physicochemical properties of bambara starch complexed with lysophosphatidylcholine. *LWT - Food Science and Technology*, 74, 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.07.035>
- Özkaya, B., Turksoy, S., Özkaya, H., Duman, B. (2017). Dephytinization of wheat and rice brans by hydrothermal autoclaving process and the evaluation of consequences for dietary fiber content, antioxidant activity and phenolics. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 39, 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.11.012>.
- Ozturk, O.K., Mert, B. (2017) The effects of microfluidization on rheological and textural properties of gluten-free corn breads. *Food Research International*, 105, 782-792. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.008>
- Ozturk, O.K., Mert, B. (2018a) Characterization and evaluation of emulsifying properties of high pressure microfluidized and pH shifted corn gluten meal. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.025>
- Ozturk, O.K., Mert, B. (2018b) The use of microfluidization for the production of xanthan and citrus fiber-based gluten-free corn breads, *LWT - Food Science and Technology*, 52, 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.12.006>
- Rezayati Charani, P., Dehghani-Firouzabadi, M., Afra, E., Shakeri, A. (2013). Rheological characterization of high concentrated MFC gel from kenaf unbleached pulp. *Cellulose*, 20(2), 727–740. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-9862-1>

- Rosa-Sibakov, N., Sibakov, J., Lahtinen, P., Poutanen, K. (2015). Wet grinding and microfluidization of wheat bran preparations: Improvement of dispersion stability by structural disintegration. *Journal of Cereal Science*, 64, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.04.002>
- Sangnark, A., & Noomhorm, A. (2003). Effect of particle sizes on functional properties of dietary fibre prepared from sugarcane bagasse. *Food Chemistry*, 80(2), 221-229. [https://doi.org/10.1016/s0308-8146\(02\)00257-1](https://doi.org/10.1016/s0308-8146(02)00257-1)
- Santos, M. D., Cunha, P., Queiros, R. P., Fidalgo, L. G., Delgadillo, I., & Saraiva, J. A. (2014). Effect of 300 and 500 MPa pressure treatments on starch-water adsorption/desorption isotherms and hysteresis. *High Pressure Research*, 34(4), 452-459 <https://doi.org/10.1080/08957959.2014.970186>
- Schober, T.J., Bean, S.R., Boyle, D.L., & Park, S.H. (2008). Improved viscoelastic zein-starch doughs for leavened gluten-free breads: Their rheology and Microstructure. *Journal of Cereal Science*, 48(3), 755–767 <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.04.004>
- Shahbazi, M., Majzoubi, M., Farahnaky, A. (2018) Physical modification of starch by high-pressure homogenization for improving functional properties of κ-carrageenan/starch blend film. *Food Hydrocolloids*, 85, 204-214. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.07.017>
- Shen, L., & Tang, C. H. (2012). Microfluidization as a potential technique to modify surface properties of soy protein isolate. *Food Research International*, 48(1), 108–118 <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.03.006>
- Shen, X., Shang, W., Strappe, P., Chen, L., Li, X., Zhou, Z., Blanchard, C. (2017) Manipulation of the internal structure of high amylose maize starch by high pressure treatment and its diverse influence on digestion, *Food Hydrocolloids*, 77, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.09.015>
- Sun, C., Yang, J., Liu, F., Yang, W., Yuan, F., Gao, Y. (2015). Effects of dynamic high-pressure microfluidization treatment and the presence of quercetagenin on the physical, structural, thermal, and morphological characteristics of zein nanoparticles. *Food and Bioprocess Technology*, 9 (2), 320–330. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1627-4>.
- Suriano, F., Neyrinck, A. M., Verspreet, J., Olivares, M., Leclercq, S., Van de Wiele, T., Courtin, C.M., Cani, P.D., Bindels, L.B., Delzenne, N.M. 2018. Particle size determines the anti-inflammatory effect of wheat bran in a model of fructose over-

- consumption: Implication of the gut microbiota. *Journal of Functional Foods*, 41, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.12.035>.
- Taheri, H., & Samyn, P. (2016). Effect of homogenization (microfluidization) process parameters in mechanical production of micro- and nanofibrillated cellulose on its rheological and morphological properties. *Cellulose*, 23, 1221–1238. <https://doi.org/10.1007/s10570-016-0866-5>
- Tang, C. H., & Ma, C. Y. (2009). Effect of high pressure treatment on aggregation and structural properties of soy protein isolate. *LWT- Food Science and Technology*, 42, 606–611. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.07.012>
- Teixeira, B., Fidalgo, L., Mendes, R., Costa, G., Cordeiro, C., Marques, A., Saraiva, J.A., Nunes, M.L. (2014) Effect of high pressure processing in the quality of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets: Pressurization rate, pressure level and holding time. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 22, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.12.005>
- Tu, Z., Chen, L., Wang, H., Ruan, C., Zhang, L., & Kou, Y. (2012). Effect of fermentation and dynamic high pressure microfluidization on dietary fibre of soybean residue. *Journal of Food Science and Technology*, 51(11), 3285–3292. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0838-1>
- Tu, Z., Yin, Y., Wang, H., Liu, G., Chen, L., Zhang, P., Kou, Y., Zhang, L. (2013). Effect of dynamic high-pressure microfluidization on the morphology characteristics and physicochemical properties of maize amylose. *Starch - Stärke*, 65(5-6), 390-397. <https://doi.org/10.1002/star.201200120>
- Vallons, K.J.R., & Arendt, E.K. (2009). Effects of high pressure and temperature on buckwheat starch characteristics. *European Food Research and Technology*, 230, 343–351. <https://doi.org/10.1007/s00217-009-1172-3>
- Vallons, K.J.R., Ryan, L.A.M., Koehler, P., Arendt, E.K. (2010a) High pressure–treated sorghum flour as a functional ingredient in the production of sorghum bread. *European Food Research and Technology*, 231, 711–717 <https://doi.org/10.1007/s00217-010-1316-5>
- Vallons, K.J.R., Ryan, L.A.M., Arendt, E.K. (2010b) Promoting structure formation by high pressure in gluten-free flours *LWT - Food Science and Technology* 44,1672-1680 <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.11.024>

- Velázquez-Estrada, R.M., Hernández-Herrero, M.M., Guamis-López, B., Roig-Sagués, A.X. (2011) Impact of ultra-high pressure homogenization on pectin methylesterase activity and microbial characteristics of orange juice: A comparative study against conventional heat pasteurization. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 13, 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.09.001>
- Villalobos-Castillejos, F., Granillo-Guerrero, V.G., Leyva-Daniel, D.E., Alamilla-Beltrán, L., Gutiérrez-López, G.F., Monroy-Villagrana, A., Jafari, S.M. (2018). Fabrication of Nanoemulsions by Microfluidization. *Nanoemulsions*, 207–232. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811838-2.00008-4>
- Wang, B., Li, D., Wang, L.J., Liu, Y.H., & Adhikari, B. (2012). Effect of high-pressure homogenization on microstructure and rheological properties of alkali-treated high-amylose maize starch. *Journal of Food Engineering*, 113(1), 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.05.021>
- Wang, H., Hu, F., Wang, C., Ramaswamy, H.S., Yu, Y., Zhu, S., Jian, W. (2020) Effect of germination and high pressure treatments on brown rice flour rheological, pasting, textural, and structural properties. *Food Processing and Preservation*, 44, 1-12. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14475>
- Wang, J., Zhu, H., Li, S., Wang, S., Wang, S., Coperland, L. (2017) Insights into structure and function of high pressure-modified starches with different crystalline polymorphs. *International Journal of Biological Macromolecules*, 102, 414-424. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.04.042>
- Wang, L., Wu, J., Luo, X., Li, Y., Wang, R., Li, Y., Li, J., & Chen, Z. (2018). Dynamic high-pressure microfluidization treatment of rice bran: effect on Pb(II) ions adsorption in vitro. *Journal of Food Science*, 83(7), 1980-1989
- Wang, T., Sun, X., Raddatz, J., Chen, G. (2013) Effects of microfluidization on microstructure and physicochemical properties of corn bran. *Journal of Cereal Science*, 58 (2),355-361. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.07.003>
- Wang, T., Sun, X., Zhou, Z., & Chen, G. (2012). Effects of microfluidization process on physicochemical properties of wheat bran. *Food Research International*, 48(2), 742-747. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.06.015>
- Wang, T., Zhu, Y., Sun, X., Raddatz, J., Zhou, Z. & Chen, G. (2014). Effect of microfluidisation on antioxidant properties of corn bran. *Food Chemistry*, 152(1), 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.059>

- Wang, X.M., Zhu, X.M., Zhang, N.H., Tu, Z.C., Wang, H., Liu, G.X., Ye, Y.H. (2018) Morphological and structural characteristics of rice amylose by dynamic high-pressure microfluidization modification. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42 (10), 13764. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13764>
- Wei, B., Cai, C., Xu, B., Jin, Z., Tian, Y. (2017) Disruption and Molecule Degradation of Waxy Maize Starch Granules during High Pressure Homogenization Process, *Food Chemistry*, 240, 165-173. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.078>
- Zhang, H., Li, L., & Mittal, G. S. (2010). Effects of high pressure processing on soybean beta-conglycinin. *Journal of Food Process and Engineering*, 33, 568–583 <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2010.00607.x>
- Zia-ur-Rehman, Z., Islam, M., & Shah, W. (2003). Effect of microwave and conventional cooking on insoluble dietary fibre components of vegetables. *Food Chemistry*, 80(2), 237-240. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00259-5](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00259-5)