



---

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

***CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE CONCENTRADO DE  
PROTEÍNAS SÉRICAS POR ULTRASONIDO DE POTENCIA Y SU USO COMO  
AGENTE LIGANTE EN UN PRODUCTO CÁRNICO FRESCO***

**TESIS DE MAESTRÍA**

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

**PRESENTA:**

Q.A. Patricia Domínguez Guerrero

**DIRECTOR DE TESIS:**

Dr. Héctor Ruiz Espinosa

**CODIRECTOR DE TESIS:**

Dra. Edith Corona Jiménez

**BUAP**

H. Puebla de Z. Enero 2022





**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA**



**ACTA DE REVISIÓN, LIBERACIÓN E IMPRESIÓN DE TESIS**

Nombre del (de la) estudiante: Patricia Domínguez Guerrero

Matrícula: 219470720

Nombre del director: DR. HÉCTOR RUIZ ESPINOSA

Nombre del codirector: DRA. EDITH CORONA JIMÉNEZ

**Título de la Tesis:**

**CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE CONCENTRADO DE PROTEÍNAS SÉRICAS POR ULTRASONIDO DE POTENCIA Y SU USO COMO AGENTE LIGANTE EN UN PRODUCTO CÁRNICO FRESCO**

**Comisión Revisora:**


Presidente: Dr. Irving Israel Ruiz López

Firma: 


Secretario(a): Dra. Paola Hernández Carranza

Firma: 

Vocal (1): Dra. Edith Corona Jiménez

Firma: 

Vocal (2): Dr. Héctor Ruiz Espinosa

Firma: 

Los integrantes de la Comisión Revisora expresamos que hemos leído y revisado el manuscrito de la tesis de maestría que presenta el (la) estudiante arriba indicado, por lo que **estamos de acuerdo en que se proceda con la impresión definitiva de la tesis y que el (la) estudiante presente su defensa y examen de grado en la fecha, horario y lugar que se indican a continuación.**

Fecha de examen: 31 de enero de 2022

Hora: 14:00 h

Día de la semana: Lunes

Lugar: Aula virtual Microsoft Teams

Indicaciones: Entregar original para su revisión y autorización en la Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado (SIEP). La copia de este documento deberá ser incluida en la tesis empastada y en su versión electrónica.

Revisa y Autoriza: Sello de la Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado - FIO - BUAP



## ÍNDICE

<b>I. PROTOCOLO DE TESIS</b> .....	8
<b>1. Datos generales</b> .....	8
<b>1.1 Datos del alumno(a)</b> .....	8
<b>1.2 Título del proyecto</b> .....	8
<b>1.3 Resumen del trabajo</b> .....	8
<b>2. Descripción del Proyecto</b> .....	11
<b>2.1 Título</b> .....	11
<b>2.2 Planteamiento del problema</b> .....	11
<b>2.3 Justificación</b> .....	12
<b>2.4 Marco teórico</b> .....	13
2.4.1 Tendencias alimentarias actuales.....	13
2.4.2 Tecnologías emergentes.....	14
2.4.3 Fundamentos del ultrasonido.....	15
2.4.4 Uso de USP como agente de modificación de ingredientes en la industria alimenticia.....	17
2.4.5 Proteínas.....	18
<b>2.4.6 Fosfatos</b> .....	19
2.4.7 La carne y los productos cárnicos.....	20
<b>2.5 Hipótesis</b> .....	22
<b>2.6 Objetivo General</b> .....	22
<b>2.7 Objetivos Específicos</b> .....	22
<b>2.8 Metodología</b> .....	23
2.8.1 Plan de investigación.....	23
2.8.2 Materiales.....	24
2.8.3 Métodos.....	24
<b>2.8 Infraestructura</b> .....	27
<b>2.9 Cronograma de actividades</b> .....	28
<b>2.10 Tablas</b> .....	29
<b>II. JUSTIFICACIÓN DE CAMBIO DE TESIS</b> .....	34
<b>III. REVIEW</b> .....	39

1. Introducción.....	39
2. Funciones de grasa en alimentos.....	42
3. Remplazantes de grasas en alimentos.....	44
4. Ultrasonido de potencia: Generalidades .....	86
5. Uso de ultrasonido de potencia para modulación de propiedades tecnológico-funcionales de polímeros alimenticios.....	92
6. Uso de polímeros alimenticios pretratados por USP como miméticos de grasa en alimentos .....	99
7. Perspectivas a futuro y conclusiones .....	100
8. Referencias bibliográficas .....	101
9. Figuras .....	168
10. Tablas .....	175

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figure 1.</b> Structure of sucrose polyester (Olestra or Olean) .....	168
<b>Figure 2.</b> Caprenin structure (caprocapylobehenic triacylglycerol) .....	168
<b>Figure 3.</b> Molecular structure of salatrim .....	169
<b>Figure 4.</b> Molecular Structure of Sorbestrin (sorbitol polyester).....	169
<b>Figure 5.</b> Molecular structure of esterified propoxylated glycerol (EPG) .....	170
<b>Figure 6.</b> General processing steps for producing WPC and WPI .....	171
<b>Figure 7.</b> General processing steps for producing CPS and ISP .....	172
<b>Figure 8.</b> Pea protein extraction methods .....	173
<b>Figure 9.</b> Enzymatic hydrolysis of starch .....	174
<b>Figure 10.</b> Approximate frequency ranges of sound waves .....	174

## LISTA DE TABLAS

### Tablas I

<b>Tabla 1.</b> Modificación de ingredientes para productos cárnicos por USP .....	29
<b>Tabla 2.</b> Ventajas y desventajas del uso de USP en la industria alimenticia .....	30
<b>Tabla 3.</b> Función, beneficio y uso final del WPC en carnes, aves y pescados.....	31
<b>Tabla 4.</b> Ingredientes principales de formulación de carne para hamburguesa ....	33

### Tablas III

<b>Table 1.</b> Main functions of fats in various foods .....	175
<b>Table 2.</b> Role of the main fat-based fat replacers in various foods .....	177
<b>Table 3.</b> Main functions of animal proteins as fat replacers in different food categories .....	179
<b>Table 4.</b> The average composition of MPC, MPI, MCCs, WPCs and WPI .....	187
<b>Table 5.</b> Chemical composition of egg yolk and egg white .....	188
<b>Table 6.</b> Main functions of plant-based protein fat replacers in different food groups .....	189
<b>Table 7.</b> Composition of different types of soy protein products.....	193
<b>Table 8.</b> Most important functions of polysaccharide-based fat replacers in food products.....	194
<b>Table 9.</b> Most common gums used as fat mimetics: source and extraction methods .....	207
<b>Table 10.</b> Common commercial starches and their amylose /amylopectin proportions.....	209
<b>Table 11.</b> Advantages and disadvantages of ultrasound applications in food products.....	210
<b>Table 12.</b> Effects of ultrasound on structural and techno-functional properties of animal properties .....	211
<b>Table 13.</b> Effects of power ultrasound in structural and functional properties of polysaccharides .....	229
<b>Table 14.</b> Most important improvements in power ultrasound-modified fat mimetics in selected food products.....	239

## **I. PROTOCOLO DE TESIS**

### **1. Datos generales**

#### **1.1 Datos del alumno(a)**

Nombre: Domínguez Guerrero Patricia

Matrícula: 219470720

Dirección: Pachuca de Soto, Hidalgo

Teléfono Celular: 771 104 5990

Correo electrónico: [dominguezpatricia0304@gmail.com](mailto:dominguezpatricia0304@gmail.com)

#### **1.2 Título del proyecto**

Cambios en las propiedades funcionales de concentrado de proteínas séricas por ultrasonido de potencia y su uso como agente ligante en un producto cárnico fresco.

#### **1.3 Resumen del trabajo**

El ultrasonido de potencia (USP) es una herramienta útil para generar cambios en propiedades tecnológicas de diferentes alimentos, a través de la modificación de la estructura y propiedades funcionales de diferentes polímeros presentes en estos productos. Así, el USP se ha empleado como agente modulador de propiedades funcionales en sistemas poliméricos los cuales, al emplearse como ingredientes en una formulación, permiten que el producto desarrolle características únicas que deben estudiarse. Se ha demostrado que la aplicación de USP en proteínas séricas conduce a su desnaturalización parcial; este cambio estructural

induce modificaciones en su capacidad de retención de agua y de aceite, capacidad gelificante, espumante, de formación de películas, entre otras. Esfuerzos recientes se han centrado en la aplicación de concentrados proteicos pretratados por USP como ingredientes de la formulación de otros productos alimenticios, tanto de naturaleza láctea como no láctea. Dado que una de las tendencias alimenticias actuales se basa en el desarrollo de alimentos de *etiqueta limpia*, es decir, aquellos con el mínimo de uso de aditivos en su formulación, el uso de ingredientes séricos ultrasonificados puede sustituir a algunos compuestos de este tipo, incluyendo gomas, estabilizantes y modificadores de funcionalidad polimérica. Dentro de esta categoría, los fosfatos son ingredientes multifuncionales que permiten modificar la estructura proteica en productos cárnicos, incrementando su capacidad de retención de agua y la integración apropiada de todos los ingredientes de la formulación. Por ello, se considera que proteínas séricas concentradas pretratadas por USP pueden emplearse como un ingrediente en la elaboración de un producto cárnico (carne para hamburguesa reducida en grasa) disminuyendo o eliminando el uso de fosfatos dentro de la formulación. Para ello se necesita identificar la variación de las propiedades funcionales en el concentrado proteico por efecto del USP y evaluar las características fisicoquímicas y sensoriales del producto elaborado con mezclas selectas de carne, proteína sérica ultrasonificada y fosfatos, comparando los resultados con los de un producto estándar sin preprocesamiento USP.

#### **1.4 Institución de realización**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

Facultad de Ingeniería Química (FIQ).

Edificio 107, 14 Sur y Av. San Claudio, Ciudad Universitaria, C.P. 72570 Puebla, Pue.

Teléfono: (222) 229 55 00 ext. 7261

#### **1.5 Beca de tesis**

Tipo de Beca: Beca Nacional, CONACYT

Vigencia: Agosto 2019 – Julio 2021

### **1.6 Datos del asesor**

Nombre: Dr. Héctor Ruiz Espinosa

Dirección: Av. Xilotzingo 10313 Casa 23 Residencial Xilotzingo, Puebla, Pue.

Teléfono: 22 21 58 20 33

Institución: Facultad de Ingeniería Química (FIQ). BUAP

Depto. Adscripción: Facultad de Ingeniería Química

Teléfono: (222) 229 55 00 ext. 2971

Grado Académico: Doctorado

Correo electrónico: [hector.ruiz@ymail.com](mailto:hector.ruiz@ymail.com) , [hector.ruiz@correo.buap.mx](mailto:hector.ruiz@correo.buap.mx)

### **1.7 Datos del coasesor**

Nombre: Edith Corona Jiménez

Dirección: Héroe de Nacozari 2805. Col. Sta. María. Puebla, Puebla. México

Tel.: 222 209 5089

Institución: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Depto. Adscripción: Facultad de Ingeniería Química

Teléfono: (222) 2 29 55 00 Ext. 2978

Grado Académico: Doctorado

Correo Electrónico: [ecoronaj@hotmail.com](mailto:ecoronaj@hotmail.com)

## **2. Descripción del Proyecto**

### **2.1 Título**

Cambios en las propiedades funcionales de concentrado de proteínas séricas por ultrasonido de potencia y su uso como agente ligante en un producto cárnico.

### **2.2 Planteamiento del problema**

Una de las principales tendencias en la industria alimentaria se orienta hacia la producción de alimentos percibidos como más naturales y, de ser posible, con el mínimo número de ingredientes y carentes de aditivos. A este tipo de productos se les conoce como de *etiqueta limpia*. Adicionalmente, otra tendencia actual se aboca a la producción de alimentos considerados *saludables*, generalmente aquellos con un contenido reducido de grasa, azúcares o sal, por ejemplo. La ausencia de algunos de estos componentes puede afectar la funcionalidad del alimento y, por tanto, demanda una solución en términos de modificación de formulaciones o de cambios en el procedimiento de elaboración que permitan paliar los efectos negativos que resulten de eliminar aditivos o ingredientes relevantes para el funcionamiento apropiado del producto.

Los fosfatos son aditivos ampliamente usados en la industria alimenticia, ya sea como amortiguadores de pH, como agentes emulsificantes, alcalinizantes o como modificadores de la capacidad de retención de agua y aceite en productos alimenticios selectos, como los cárnicos, donde también puede actuar como modificador de proteínas, participando en el ligado entre trozos de carne a través de la extracción proteica durante el mezclado o amasado. Dentro de los principales fosfatos empleados en este tipo de productos se encuentran los pirofosfatos, tripolifosfatos y hexametáfosfatos de sodio y potasio. Tomando en cuenta la

necesidad de generar productos con etiquetas limpias, se ha optado por sustituir a los fosfatos con ingredientes alimenticios que sean percibidos como naturales, los cuales, además de desarrollar una funcionalidad análoga a la de estos aditivos, no alteren las características sensoriales de los cárnicos elaborados. Dentro de estos componentes destacan diversos hidrocoloides como harinas de cereales (trigo, avena, maíz), almidones, gomas alimenticias, proteínas vegetales, caseinatos y concentrados de proteínas de leche y de suero, entre otras.

En tiempos recientes, los concentrados de proteína de suero de leche (WPC por sus siglas en inglés) se han utilizado ampliamente en la formulación de nuevos productos alimenticios como un ingrediente de alta calidad desde el punto de vista nutricional y tecnológico; diversos autores han propuesto su uso como agente gelificante, espumante, ligante o emulsificante en productos lácteos como yogurt, helados y bebidas lácteas, en diversos productos de panificación y en productos cárnicos cocidos (salchicha, jamones) y elaborados con carne molida (*patties* para hamburguesa, albóndigas) reportando cambios estructurales, tecnológicos, sensoriales y nutricionales favorables. Sin embargo, existe la posibilidad de alterar o modular la funcionalidad de estos concentrados a través de variables térmicas y no térmicas de procesamiento, incluyendo alta presión hidrostática, técnicas de cizallamiento (homogeneización a alta presión, microfluidización), campos eléctricos pulsados y ultrasonido de potencia. La aplicación de estas barreras se ha demostrado que puede generar desnaturalización y reconfiguración de las proteínas séricas. Modificándolas estructuralmente y cambiando con ello su comportamiento como ingrediente alimenticio.

### **2.3 Justificación**

La modificación convencional de concentrados proteicos comprende el uso de métodos térmicos que son considerados críticos ya que si se aplican a magnitudes elevadas pueden comprometer las propiedades funcionales de la proteína limitando su posible uso en varios productos alimenticios. Es por ello por lo

que los principales desafíos tecnológicos se orientan al desarrollo de métodos nuevos, seguros y efectivos que puedan sustituir los tratamientos térmicos convencionales y que a su vez permitan potencializar las propiedades tecnológico-funcionales de estos concentrados, sin sacrificar su calidad sensorial. Varias de estas nuevas alternativas de procesamiento se clasifican como tecnologías emergentes o no térmicas; dentro de estas últimas destaca el ultrasonido de potencia (USP).

El USP se define como un conjunto de ondas sonoras con un rango de frecuencia de 20 a 100 kHz. El uso del USP es explorado intensamente en la actualidad debido a su versatilidad para la alteración, generación y modificación de microestructuras, sin el uso de aditivos o tratamientos térmicos. Se ha demostrado que la aplicación de USP permite modular las características funcionales de distintos polímeros alimenticios. En el caso concreto de WPC, el uso de USP permitió modificar sus características tecnológicas en dispersión acuosa, incluyendo capacidad gelificante, espesante, espumante, de retención de agua y aceite y de formación de películas; estos cambios funcionales pueden repercutir de manera positiva o negativa en las propiedades fisicoquímicas de los alimentos al momento de ser aplicados como ingredientes sustituyendo aditivos, por ejemplo, el remplazo total o parcial de polifosfatos en productos cárnicos. Sin embargo, los reportes del uso de USP para la modulación de propiedades tecnológicas de WPC para usarse en productos cárnicos es limitado y no se encontraron reportes en cárnicos frescos; por ello, se considera que esto representa un área de interés para explorarse a profundidad.

## **2.4 Marco teórico**

### **2.4.1 Tendencias alimentarias actuales**

La industria alimentaria ha sufrido una constante evolución, afectada directamente por las tendencias globales de consumo y procesamiento en las que se desenvuelve el sistema alimentario mundial. Detectar y estudiar esos cambios

permite poder dar respuesta a las demandas de los consumidores potenciales y anticiparse a las del futuro. Las tendencias alimentarias son diversas y en ocasiones complementarias; algunas de ellas se enfocan a la producción de alimentos percibidos como saludables; dentro de este grupo se encuentran productos funcionales, con compuestos bioactivos, bajos en calorías libres, reducidos en grasas, azúcares, sales y bajos o carentes de aditivos sintéticos (los conocidos como productos de etiqueta limpia) (Gu et al., 2019). Esta tendencia, una de las más dinámicas y relevantes en el ámbito industrial está siendo impulsadas por consumidores conscientes de la relación entre alimentación y salud y prefieren ingerir productos tan naturales como sea posible. La elaboración de estos nuevos alimentos está basada en la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías, formulaciones y métodos de conservación o procesamiento de alimentos que permitan acercarse a ese objetivo deseable (Langreo, 2019).

El tratamiento térmico es uno de los métodos principales para garantizar la seguridad de los alimentos ya que garantiza la eliminación de microorganismos patógenos mientras es capaz de prolongar su vida útil mediante la inactivación parcial de microorganismos y enzimas deteriorativas; asimismo, puede mejorar la calidad de los productos potencializando en algunos casos su sabor, color o textura; sin embargo, su principal inconveniente radica en que puede afectar al valor nutritivo y las propiedades sensoriales en alimentos selectos. Es por ello por lo que se han estudiado y desarrollado diferentes métodos y tecnologías no térmicas que permitan la modificación de los diferentes ingredientes alimenticios que mejoren, en la medida de lo posible, la funcionalidad y que ayuden a reducir la cantidad de aditivos empleados y que presenten una mejor calidad nutritiva y sensorial (Fernández et al., 2001). A estos procesos nuevos se le conoce de forma general como tecnologías emergentes o no térmicas.

#### 2.4.2 Tecnologías emergentes

Las tecnologías emergentes son métodos o procesos no térmicos, que tiene como fin preservar las características nutricionales y sensoriales de los alimentos, así como prolongar su vida útil. Estas tecnologías son generalmente usadas a temperatura ambiente y se distinguen por obtener productos seguros, similares a los frescos, libres de químicos y/o aditivos y además presentan un ahorro energético. Entre las principales tecnologías emergentes destacan el procesamiento a alta presión, los campos eléctricos pulsados, los pulsos de luz, el procesamiento con luz V, los campos magnéticos oscilantes y el ultrasonido de potencia. Este último, ha exhibido un gran número de aplicaciones en alimentos en tiempos recientes y se describe a continuación (Madhu *et al.*, 2019).

#### 2.4.3 Fundamentos del ultrasonido

El ultrasonido (US), es una tecnología que consiste simplemente en la propagación de ondas de presión longitudinales que pasan por un medio. Las partículas del medio responden a la propagación de estas ondas vibrando y generando zonas de alta y baja presión, también conocidas como zonas de compresión y rarefacción. El tipo de onda de sonido está determinado por su frecuencia.

El rango de humanos, la audición es de alrededor de 20 Hz a ~20 kHz. El ultrasonido se refiere a ondas de sonido que están en una frecuencia por encima de los 20 kHz. En este último rango se puede dividir en dos zonas: De potencia si se encuentra de un rango de frecuencia de 20 kHz a alrededor de 1 MHz y de diagnóstico cuando tiene una frecuencia superior a 1 MHz (Feng *et al.*, 2011).

De acuerdo con su intensidad, el US puede clasificarse en de baja intensidad y de alta intensidad, conocido también como US de potencia (USP). El US de baja intensidad utiliza frecuencias más altas que 100 kHz e intensidades por debajo de 1 W/cm<sup>2</sup> y es utilizado como una técnica de análisis y monitoreo de varios alimentos durante el procesamiento y almacenamiento; por ejemplo, permite estudiar y caracterizar la matriz de quesos madurados durante su maduración

(Nassar *et al.*, 2010), esta técnica se considera una prueba no destructiva ya que las ondas ultrasónicas no causan daños físicos ni químicos permanentes en el alimento. El US de alta intensidad comprende potencias mayores a  $1 \text{ W/cm}^2$  y frecuencias entre 20 y 100 kHz, útil para el procesamiento y/o estabilización de alimentos.

El US es una onda de presión de alta frecuencia. A medida que esta onda de presión pasa a través del medio, se crean regiones de alta y baja presión. El tamaño de estas variaciones de presión, se denominan amplitud de la onda de presión o presión acústica y es directamente proporcional a la cantidad de energía aplicada al sistema. El ultrasonido puede realizar cambios en medios líquidos, sólidos y gaseosos. Esta tecnología puede ser aplicada en diferentes formas ya sea variando la intensidad, la frecuencia, la amplitud, la temperatura, la presión y el tiempo de exposición, parámetros que dependerán de las características de los materiales y sobre todo de los resultados que se desean obtener (Yadav *et al.*, 2014).

Un sistema de producción de ondas ultrasónicas está compuesto por un generador que produce energía eléctrica o mecánica, un transductor que convierte esta energía en energía sonora a frecuencias ultrasónicas y un sistema de aplicación (Feng *et al.*, 2011). Los efectos que se presentan en el uso de USP se clasifican en dos categorías:

**Efectos Físicos:** Cuando es aplicado a un medio líquido ocurre el fenómeno conocido como cavitación, el cual es el responsable de generar los principales cambios. La cavitación es el proceso de formación de burbujas y está dada en función de la presión de vapor de la solución, la tensión superficial, el radio inicial de las nano-burbujas y la presión del sistema. Las burbujas formadas a través de la cavitación comenzarán a expandirse y colapsar bajo la influencia del campo acústico que puede ocurrir en dos formas: una en donde la fase de expansión se alarga y es seguido por un colapso violento formando burbujas más pequeñas conocido como cavitación inercial o transitoria y la otra forma es cuando la oscilación

de burbujas puede persistir durante muchos ciclos acústicos y es conocido como cavitación estable o repetitiva (Li *et al.* 2019).

**Efectos Químicos:** el colapso violento que ocurre durante la cavitación transitoria puede generar aumentos de temperaturas a un nivel localizado (> 5,000 K) (Fu *et al.*, 2019). Estas altas temperaturas y los cambios violentos de presión que ocurren pueden causar una serie de cambios químicos, uno de los cambios más importantes que puede ocurrir es la formación de radicales libres que pueden recombinarse para formar nuevas moléculas (Adewuri, 2001).

#### 2.4.4 Uso de USP como agente de modificación de ingredientes en la industria alimenticia

El USP tiene un efecto importante en diversos procesos en la industria alimentaria, debido a su capacidad de intensificar los procesos, reduciendo los tiempos e incrementando los rendimientos. Sus principales aplicaciones han sido en la formación de emulsificación, la deshidratación, secado y congelación de alimentos, la extracción de compuestos, la inactivación de enzimas, la modificación de polisacáridos, en la limpieza de equipos y como antiespumante (Alarcon *et al.*, 2018).

El uso del USP en la industria cárnica comenzó con la evaluación de la grasa y los músculos del ganado vivo, se usa habitualmente para mejorar la calidad, el sabor y la textura, que representan los atributos de calidad más importantes en la satisfacción del consumidor (Frimpong & Muhammad 2019). Muchos estudios recientes han reportado usos potenciales de ultrasonido de potencia en carne fresca para mejorar los procesos de congelación, descongelación, salmuera de carne, cocción, inhibición bacteriana y ablandamiento, y en ingredientes para productos cárnicos (Carrillo *et al.*, 2017). Los resultados obtenidos varían según el equipo de USP utilizado y la potencia, frecuencia y tiempos de sonicación, así como las características del sistema alimentario utilizado. En la Tabla 1 se resumen los principales ingredientes modificados por medios de este equipo (Telléz-Morales *et*

*al., 2019*). El USP ofrece numerosas ventajas en la industria alimentaria, así como algunas desventajas, las cuales se resumen en la Tabla 2 (Majid *et al.*, 2015).

## 2.4.5 Proteínas

### 2.4.5.1 Definición de proteína

Las proteínas son macromoléculas que están formadas por carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno fundamentalmente, aunque también pueden contener minerales como azufre, hierro y fósforo (Fennema *et al.*, 2010). La parte más pequeña en que se pueden dividir son unas unidades estructurales denominadas aminoácidos. Los aminoácidos se caracterizan por poseer un grupo de carboxilo (-COOH) y un grupo amino (-NH<sub>2</sub>). Los alimentos que ingerimos nos aportan estas proteínas, pero se absorben en forma de aminoácidos y cadenas cortas de péptidos después de su hidrólisis en el proceso de digestión.

### 2.4.5.2 Proteínas de suero de leche

El concentrado de proteína de suero se obtiene del suero de la leche; es un subproducto de la fabricación de quesos. Durante la fabricación de quesos, en la fase de la coagulación se separa del suero en forma de un líquido amarillo formado por agua, proteínas y grasas de alto valor nutritivo. Actualmente es usado como materia prima para la elaboración de concentrados de proteína, que puede ser usado en una amplia variedad de alimentos. El concentrado de proteína se obtiene en diferentes presentaciones (Kelly 2019).

- Concentrado de proteína de suero de leche (WPC: Whey Protein Concentrate): La concentración de proteína puede ir del 29 al 89 %. En la fabricación de alimentos aporta propiedades funcionales como emulsionante, agente de volumen y textura. Se usan en la elaboración de

productos cárnicos (salchichas y carnes procesadas). En la tabla 3, se resume las principales funciones, beneficios y uso final del WPC en carnes, aves y pescados (Prabhu, G.2006).

- Aislado de proteína de suero de leche (WPI: Whey Protein Isolate): es una proteína con mayor pureza, la concentración en el aislado es de 90% al 94%. Se usa principalmente en suplementos alimenticios y en alimentos funcionales.

Los WPC pueden utilizarse de manera efectiva como ingrediente funcional en carne de hamburguesas bajas en grasa debido a sus propiedades emulsificantes y de gelación por calor, razón por la cual se busca mejorar estas propiedades por medio del USP. Su uso ha estado ganando terreno en la aplicación de modificación de proteínas.

#### **2.4.6 Fosfatos**

Los fosfatos son las sales o los ésteres del ácido fosfórico, el ácido más importante derivado directamente del elemento químico fósforo. Se componen de un anión trivalente que contiene un átomo de fósforo y cuatro átomos de oxígeno. Son sustancias inorgánicas conocidas por estar presentes en organismos vivos y minerales y en la mayoría de los sistemas alimenticios, siendo utilizados como ingredientes funcionales. En la industria alimentaria, los fosfatos tienen la función de aumentar la capacidad de retención del agua y proteger contra la rancidez oxidativa, amortiguar el pH, alcalinizar, como agente emulsificante, secuestrante y modificadores de proteína. Sus principales aplicaciones son; en el sector de panificación, en el procesamiento de carnes, aves y mariscos y en la producción de productos lácteos. En el procesamiento de productos cárnicos se utilizan cuatro tipos de fosfatos: el STP (Tripolifosfato de Sodio), el SKTP (Tripolifosfato de Sodio y Potasio), el TSPP (Pirofosfato Tetrasódico) y el SAPP (Pirofosfato Ácido de

Sodio); sin embargo, la industria alimentaria busca de alguna manera reducir y/o sustituir su uso (Official Portal of Government of La Rioja, 2019).

#### 2.4.7 La carne y los productos cárnicos

La carne corresponde a la parte muscular comestible de los animales de abasto sacrificados y faenados en condiciones higiénicas. Se incluyen las porciones de grasa, hueso, cartílago, piel, tendones, nervios y vasos linfáticos y sanguíneos que normalmente acompañan al tejido muscular y que no se separan de él en los procesos de manipulación, preparación y transformación.

Los componentes mayoritarios de la carne, variables según la especie de origen, son agua (65-80%), proteína (16-22%) y grasa (1 a 15%). Estos pueden variar en función, de la raza, del sexo, de la edad del animal e incluso del alimento administrado al animal (Kerry *et al.*,2002). En la composición de la carne también se encuentran los minerales de elevada biodisponibilidad como el hierro y zinc y vitaminas (B6, B12, retinol y tiamina) (Fennema *et al.*, 2010).

Los productos cárnicos son aquellos en los que se han modificado las propiedades de la carne fresca, mediante el empleo de una o más técnicas tales como la molienda, la adición de condimentos o aditivos, modificación de color o tratamientos térmicos. La elaboración de productos cárnicos se lleva a cabo con la finalidad de alargar la vida útil, desarrollar diferentes sabores a las características de la carne fresca, utilizar partes del animal que son difíciles de comercializar en su estado fresco y para mejorar el valor nutritivo y las características sensoriales de los productos cárnicos. Los productos cárnicos se clasifican en (Ranken, 2000):

1. Productos cárnicos crudos. Son aquéllos sometidos a un proceso tecnológico que no incluye un tratamiento térmico y pueden ser: a) *crudos frescos*, aquellos elaborados con carne y grasa molidas, con adición o no de subproductos y/o extensores y/o aditivos permitidos, embutidos o no, que pueden ser curados y/o ahumados o no (p.e. carne para hamburguesas,

longanizas, butifarra fresca de cerdo, picadillo extendido, masas crudas); b) *crudos fermentados*, que son productos elaborados con carne y grasa molidas o picadas o piezas de carne íntegras, embutidos o no que se someten a un proceso de maduración con la adición o no de cultivos iniciadores y aditivos permitidos, pudiendo ser curados o no, secados o no y ahumados o no (chorizos, salamis, pastas untables, jamón crudo, salchichones y tocinetas crudos fermentados) y c) *crudos salados*, aquellos elaborados con piezas de carne o subproductos y conservados por medio de un proceso de salado, pudiendo ser curados, ahumados, secados o no (tocino) (Ranken, 2000).

2. Productos cárnicos tratados con calor. Son los que durante su elaboración han sido sometidos a algún tipo de tratamiento térmico; se subclasifican en:
  - a. Embutidos y moldeados: elaborados con un tipo de carne o una mezcla de 2 o más carnes y grasa, colocados en tripas naturales o artificiales o moldes y que se someten a uno o más tratamientos de curado, secado, ahumado o cocción.
  - b. Piezas íntegras curadas y ahumadas: elaborados con piezas íntegras y aditivos permitidos, con adición o no de extensores (jamones, tocineta, lomo ahumado)
3. Productos cárnicos semielaborados. Son elaborados con carne molida o picada o en piezas, con adición o no de tejido graso, subproductos, extensores y aditivos permitidos, que han recibido un tratamiento térmico durante su elaboración, pero que necesitan ser cocinados para consumirlos.
4. Conservas cárnicas. Son productos cárnicos que se tratan adecuadamente con calor en envases cerrados, herméticos y que pueden ser almacenados por un largo tiempo.

La hamburguesa constituye una alternativa de presentación de la carne de res que data de la Edad Media. Posteriormente, la revolución industrial permitió el incremento de su consumo. Durante la fabricación de la carne para hamburguesa se usan algún tipo de proteínas y/o aditivo, para mejorar el ligado del agua en el proceso de molienda y/o emulsificación, permitiendo mantener el contenido de proteínas en el producto, así como mejorar la formación y estabilidad de la mezcla, generando como beneficios, el incremento de la jugosidad y la textura. En la Tabla 4 se presenta una formulación de hamburguesa conteniendo WPC, sus principales ingredientes y proporciones típicas de adición (USDEC.Org. 2019: U.S. Dairy Export Council).

## **2.5 Hipótesis**

El ultrasonido de potencia modifica las propiedades tecnológicas de la proteína concentrada de suero, la cual puede integrarse en la formulación de un producto cárnico fresco permitiendo modificar o modular sus características de calidad, reduciendo o presidiendo del uso de aditivos ligantes.

## **2.6 Objetivo General**

Modificar las propiedades tecnológicas de WPC en dispersión acuosa por medio de ultrasonido de potencia, incluyéndolo dentro de la formulación de un producto cárnico fresco para reducir o eliminar el uso de aditivos ligantes.

## **2.7 Objetivos Específicos**

1. Definir parámetros de proceso ultrasónico de potencia (potencia, tiempo, amplitud) y concentración de dispersiones acuosas de WPC adecuadas para generar cambios deseables en las propiedades fisicoquímicas relevantes para su uso como ingrediente alimenticio.
2. Determinar cambios en las propiedades funcionales de los concentrados de proteínas séricas dispersas en medio acuoso a una concentración

predefinida mediante pruebas predictivas específicas de capacidad tecnológica.

3. Optimizar la formulación de un producto cárnico fresco con WPC modificado por ultrasonido de potencia y/o un agente ligante convencional a través de un diseño estadístico de mezclas.

## **2.8 Metodología**

### **2.8.1 Plan de investigación**

La presente investigación estará dividida en 3 etapas:

- a) Etapa 1. Determinación de concentración y tiempo de sonicación de WPC: se realizarán pruebas preliminares para determinar el grado de concentración en g WPC/100 g dispersión acuosa y los tiempos de proceso ultrasónico para pretratar la dispersión. Se explorarán dispersiones de 10, 20 y 30% de WPC 80, procesándolas por 1, 3 y 5 min de tratamiento ultrasónico y evaluando la viscosidad final de la muestra, cambios conformacionales de la proteína por FTIR y el cambio en hidrofobicidad de la muestra por método fluorométrico. Se elegirán aquellas combinaciones de g WPC80/100 g dispersión y tiempo de proceso que se emplearán en el resto del proyecto.
  
- b) Etapa 2. Pruebas predictivas de concentrados proteicos pretratados por ultrasonido: Los tratamientos y dispersiones seleccionadas se liofilizarán y los concentrados se someterán a pruebas predictivas específicas (capacidad de retención de agua, capacidad de retención de aceite, capacidad emulsificante) que permitan evaluar su adecuación como posible sustituto de fosfatos en la formulación de un producto cárnico fresco. Se elegirán al menos dos concentrados pretratados para la etapa final del proyecto.

- c) Etapa 3. Diseño de mezclas: se implementará un diseño de mezclas de tres componentes (triangular) para la elaboración de un producto cárnico fresco a partir de carne, un agente ligante comercial y WPC80 como ingredientes. Se evaluarán factores de calidad fisicoquímica (color, textura) y aceptabilidad sensorial de las muestras, comparándolas con muestras control (una formulación convencional con proteína de suero sin pretratamiento ultrasónico y otra con un agente ligante convencional) (El-Magoli et al.1996).

### 2.8.2 Materiales

Las principales materias primas para utilizarse en el presente proyecto se describen a continuación.

- a) WPC 80: se empleará proteína concentrada de suero de leche Lacprodan 80 (WPC-80) (Arla Foods; Viby, Dinamarca); este producto se genera por ultrafiltración y diafiltración de suero dulce de quesería, cuyo retenido es posteriormente secado por aspersión.
- b) Tripolifosfato de sodio y pirofosfato tetrasódico (Peisa Foods S.A. de C.V.).
- c) Carne molida de res, 75%, adquirida en un supermercado local.
- d) Sal yodatada convencional, adquirida localmente.

### 2.8.3 Métodos

- **Tratamiento ultrasónico**

El tratamiento ultrasónico se realizará en un ultrasonido tipo sonda (Hielscher UP400s, Teltow, Alemania), con 400 W de potencia, con amplitudes variables (30-100%) y que opera a una frecuencia de 24 kHz. Se utilizará un sonotrodo de 22 mm de diámetro (Hielscher, H22L2D, Alemania) manteniendo una temperatura de  $37 \pm 2$  °C con ayuda de un

baño de recirculación con controlador digital de temperatura. Se empleará una celda enchaquetada de flujo) acoplada al ultrasonido de sonda. El equipo se calibrará calorimétricamente previo a su operación.

- **Pruebas y tratamientos de etapa 1 (dispersiones y tiempos de USP variables)**

1. **Hidrofobicidad proteica:** Para la determinación de hidrofobicidad superficial de muestras de proteínas dispersas se determinará mediante una sonda de fluorescencia con ANS (*1-anilino-8-naftalenosulfonato*) de acuerdo con el método modificado de Hu *et al.* (2013).
2. **Viscosidad:** se realizarán en un reómetro Brookfield RST-CP (Middleboro, MA) de acuerdo con el método de Pang et al (2014).
3. **FTIR:** Para identificar cambios en la estructura secundaria de la proteína, se utilizará un espectrómetro Bruker® modelo Vertex 70 en el modo de Reflectancia Total Atenuada (ATR por sus siglas en ingles). Para el análisis se colocará una alícuota de 15 µL de cada una de las muestras y se coleccionará el espectro dentro del rango de 4000-400 cm<sup>-1</sup> realizando 120 mediciones por muestra (Ruvalcaba, 2015).
4. **Microscopía electrónica:** se obtendrán micrográficas empleando microscopio de barrido de barrido (SEM) de bajo voltaje.
5. **Liofilización:** las muestras pretratadas por USP se liofilizarán en un equipo Freezone Labconco

- **Pruebas en dispersiones liofilizadas:**

1. **Capacidad de retención de agua:** se evaluará de acuerdo con el método de Holder (Updegrave, 2005), midiendo el volumen de exudado en geles termoformados en tubos Falcon al someterse a centrifugado (4500 rpm, 40 min).

2. **Capacidad de retención de aceite:** la capacidad de absorción espontánea del WPC y la tasa de absorción de aceite se determinará directamente añadiendo un aceite comestible comercial a una masa conocida de WPC pretratado por USP, de acuerdo con el método descrito por Kanteriwickz *et al.* (1989).
  3. **Capacidad emulsificante:** se determinará por el método descrito por Euston y Hirtz (2000)
- **Pruebas en producto cárnico fresco (hamburguesa):**
    1. **Color:** se medirán parámetros L, a, b en un colorímetro triestímulo Hunterlab Colorflex EZ (Reston, VA), como reportan Chung *et al.*, (2013). Posteriormente se calcularán los parámetros hue y chroma.
    2. **Textura:** se evaluará instrumentalmente en un texturómetro TAXT-Plus (Texture Technologies, Surrey, Reino Unido), realizando las mediciones en muestras equilibradas a 10°C; se determinará el análisis de perfil de textura de la hamburguesa evaluando parámetros primarios (dureza, elasticidad, cohesividad) y terciario (masticabilidad).
  - **Pruebas en producto cocido**
    1. **Humedad en producto cocido:** Se evaluará el porcentaje de humedad por pérdida de peso después de 12-18 h de secado en un horno convencional a 105 °C; el valor obtenido en este análisis se usará para calcular la retención de humedad (RH) que representará la cantidad de humedad retenida en el producto cocido por 100 g de muestra cruda, empleando la Ec. 1 (El-Magoli *et al.*1996).

$$RH (\%) = \frac{\text{Porcentaje de Rendimiento}}{\text{Porcentaje de Humedad post-cocido}} * 100 \quad \text{Ec. 1}$$

2. **Rendimiento post-cocción:** se calculará como el rendimiento por 100 gramos de carne, usando la Ec. 2 (El-Magoli et al.1996).

$$\text{Rendimiento de cocción (\%)} = \frac{\text{Peso de producto cocido}}{\text{Peso bruto (Crudo)}} * 100 \quad \text{Ec. 2}$$

3. **Análisis de imagen para encogimiento de carne:** Se medirá el cambio dimensional relativo de volumen, área o grosor, donde el volumen de encogimiento es representado con  $V/V_0$  (El-Magoli et al.1996). Donde EB y DB representa es espesor y diámetro bruto de la muestra antes de la cocción, respectivamente y EC y DC es el espesor y diámetro después de la cocción.

$$\text{Contracción (\%)} = \frac{(EB - EC) + (DB - DC)}{(\text{Grosor bruto} + \text{Diámetro Bruto})} * 100 \quad \text{Ec. 3}$$

4. **Análisis de cambios en color con Matlab:** Se tomará una imagen mediante una cámara digital del producto crudo y cocido, y se descargarán a una computadora, posteriormente los valores de  $L^*$   $a^*$   $b^*$  de las fotografías se alimentarán al programa Matlab en un modelo matemáticos propuesto por Magran *et al.* (2011).
5. **Análisis sensorial:** se realizará una prueba de aceptabilidad con al menos 30 evaluadores no entrenados empleando una escala hedónica no estructurada, *con me disgusta mucho* y *me gusta mucho* como referencias.

## 2.8 Infraestructura

- Ultrasonido de sonda Hielscher UP 400S, con potencia de 400 W y frecuencia de 24 KHz, acoplado a una celda enchaquetada de flujo (Hielscher, GD22K, Alemania).
- Baño termostado de enfriamiento (Polyscience, AD07R-20, EUA).
- Analizador rápido ultrasónico Lactoscan LA
- Colorímetro triestímulo Hunterlab
- Texturómetro TAXT-Plus (Texture Technologies, Surrey, UK).
- Espectrómetro Bruker Vertex 70 en modo ATR\*
- Espectrofluorómetro Ocean Optics (USB4000-FL)\*
- Reómetro Brookfield RST-CP\*
- Liofilizador LABCONCO\*\*
- Microscopio electrónico SEM de bajo voltaje\*\*\*

\*En CIBA-IPN (Tlaxcala)

\*\*En Universidad Iberoamericana-Puebla

\*\*\* En Universidad de las Américas-Puebla

## 2.9 Cronograma de actividades

Año	2019	2020												2021				
Semestre		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
Actividades																		
Revisión bibliográfica																		
Elaboración de protocolo																		
Experimental																		
<i>Etapas I: Determinación de concentración y tiempo de sonicación de WPC.</i>																		



**Tabla 2.** Ventajas y desventajas del uso de USP en la industria alimenticia

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Las ondas de ultrasonido son seguras, ecológicas y no tóxicas.	Debido al esfuerzo cortante desarrollado por los efectos mecánicos provoca la inactivación de los productos liberados.
Es un medio eficaz para la inactivación microbiana.	Necesita mayor aporte de energía, lo que hace que las industrias piensen al usar esta técnica a escala industrial.
Requiere un menor costo de operación y además presenta una mayor facilidad de operación.	Induce efectos fisicoquímicos que pueden ser responsables del deterioro de la calidad por el desarrollo de sabores desagradables, alteraciones en las propiedades físicas y degradación de los componentes.
Proporciona mayor rendimiento y tasa de extracción en comparación con otros métodos de extracción convencionales.	Conduce la formación de radicales como resultado de la temperatura y presión crítica.
Presenta una menor pérdida de sabor y mayor consistencia (viscosidad, homogeneización)	La frecuencia de las ondas puede imponer resistencia a la transferencia de masa

**Tabla 3.** Función, beneficio y uso final del WPC en carnes, aves y pescados

<b>Función</b>	<b>Beneficio</b>	<b>Uso final</b>
Adhesión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora la textura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contribuye adherencia de pan o condimentos</li> </ul>
Gelación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forma geles irreversibles</li> <li>• Atrapa el agua dentro de los capilares de la matriz del gel y mejora la capacidad aglutinante del agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora el valor de producción de jamón surimi</li> <li>• Modificar las propiedades de textura dureza, cohesión y elasticidad de productos procesados</li> </ul>
Viscosidad y aglutinamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El calentamiento incrementa la viscosidad y provee sitios de aglutinamiento de agua adicionales</li> <li>• Provee cuerpo y textura</li> <li>• Añade masticabilidad, mordida y firmeza</li> <li>• Mejora la jugosidad</li> <li>• Mejora la facilidad para rebanar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reemplaza la grasa en carne procesada y en productos de ave bajos en grasa</li> </ul>

Dorado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejoras las reacciones de Maillard enzimáticas y no enzimáticas</li> <li>• Mejora la atracción visual</li> <li>• Añade color</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incrementa el rojizo de la carne bajo en grasa y sin grasa</li> </ul>
Sabor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intensifica el sabor debido a la presencia de lactosa</li> <li>• Enmascara el sabor amargo posterior de las sales y los fosfatos</li> <li>• Actúa como un transportador de sabor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intensifica el sabor de algunos productos cárnicos</li> </ul>
Nutrición	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena fuente de calcio</li> <li>• Excelente fuente de aminoácidos fácilmente digeribles y biodisponibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora la imagen saludable de los productos de carne procesada sin grasa y bajo en grasa</li> </ul>

**Tabla 4.** Ingredientes principales de formulación de carne para hamburguesa

<b>Ingredientes</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Carne de res bajo en grasa, 90% magra	85.20
Agua	10.00
Concentrado de Proteína sérica, 80% proteína (WPC80)	4.00
Sal	0.50
Tripolifosfatos	0.30
Total	100

## II. JUSTIFICACIÓN DE CAMBIO DE TEMA

La contingencia sanitaria impidió realizar la parte experimental de la tesis, dado que ningún alumno de posgrado de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla tiene permitido ingresar a los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química; y considerando que aún es imposible establecer una fecha definitiva para retornar las actividades presenciales, y tomando en cuenta que la Maestría en Ingeniería Química pertenece al Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) con un periodo vigente de entrega de 2 años (Agosto 2019 – Julio 2021), el Comité Tutorial determino pertinentemente la elaboración de un review. Esta decisión, se plasmó en una solicitud dirigida al Comité Académico De Posgrado para su aprobación (Figura 1; Solicitud de modificación de tesis), la cual el día 10 de febrero de 2021 a las 14:00 h. en la Sesión Extraordinaria Virtual del Comité de la Maestría en Ingeniería Química, se plasma en el Acta la aprobación de dicha solicitud (Figura 2; Acta de la Sesión Extraordinaria), razón por la cual se elabora un review sobre el estado del arte de la *Modulación de propiedades tecnológicas de polímeros alimenticios por ultrasonido de potencia y su uso potencial como miméticos de grasa en alimentos bajos o reducidos en grasa*, la cual se someterá a publicación a la revista *Food Research International* (ISSN: 0963-9969, IF: 4.972) para complementar el proyecto de tesis. Cabe mencionar que el Comité Académico del Posgrado respalda que la elaboración y entrega de un documento de esta naturaleza se considera un producto de alta calidad académica.

Puebla, Puebla, a 27 de enero de 2021  
**Asunto: Solicitud de modificación en tesis de maestría**

**COMITÉ ACADÉMICO DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
PRESENTE**

Por este medio les enviamos un cordial saludo y ponemos a su consideración el siguiente asunto relacionado con la tesis de la alumna Patricia Domínguez Guerrero con número de matrícula 219470720 de la Generación 2019 de la Maestría en Ingeniería Química. A la fecha, Patricia ha tenido un desempeño adecuado en sus estudios de posgrado, con un promedio acumulado de 9.3 y sin asignaturas recursadas.

En febrero del año pasado, Patricia empezó a trabajar en la parte experimental de su proyecto denominado *Cambios en las propiedades funcionales de concentrado de proteínas séricas por ultrasonido de potencia y su uso como agente ligante en un producto cármico fresco*; sin embargo, debido a la emergencia sanitaria que estamos atravesando por la epidemia de Covid-19, a la consecuente prohibición para ingresar a las instalaciones universitarias y a la recomendación institucional para no realizar estancias externas le ha sido imposible continuar con el desarrollo experimental de la investigación. A la fecha, Patricia está por concluir la redacción de la revisión bibliográfica y la metodología de su documento de tesis. No obstante, debido a las limitantes antes expuestas, aunado al hecho que resulta imposible definir con claridad una fecha tentativa para reiniciar labores en nuestra institución y con la consigna de no arriesgar la salud de la estudiante, solicitamos el aval del Comité Tutorial para evaluarla mediante la presentación de los avances del documento de tesis y la elaboración de un *review* relevante para su tema de estudio para someterlo a publicación en una revista indizada internacional, considerando este producto como de alta calidad académica. Atendiendo a las circunstancias extraordinarias que estamos viviendo, el Comité consideró pertinente esta propuesta en noviembre pasado; el aval del Comité Tutorial fue notificado a la Coordinadora del programa, Dra. Claudia Santacruz Vázquez y al entonces Secretario de Posgrado de la FIQ, Dr. Irving Israel Ruiz López, mismo que

forma parte del Comité de la estudiante. Cabe mencionar que el formato de Evaluación semestral Julio-Diciembre 2020 para CONACYT se redactó y envió en estos mismos términos.

Tomando en cuenta todo lo anterior, solicitamos al Comité Académico del Posgrado su aval para continuar con el desarrollo del proyecto en la modalidad antes descrita, considerando que es una solución si bien no ideal, si viable, que no va en detrimento de la calidad académica del programa, es respetuosa con los tiempos y el avance académico que ha tenido la estudiante y no compromete los indicadores de eficiencia terminal de la maestría.

Esperando su respuesta, quedamos de ustedes. Sinceramente,



**Dr. Héctor Ruiz Espinosa**  
Director del Proyecto



**Dra. Edith Corona Jiménez**  
Codirector

Ccp. Dra. Esmeralda Vidal Robles, Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado, FIQ  
Ccp. Dra. Claudia Santacruz, Coordinación de la Maestría de Ingeniería Química

*Figura 1: Solicitud de modificación de tesis (Continuación)*

**ACTA DE LA SESIÓN EXTRAORDINARIA VIRTUAL DEL COMITE DE LA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA DEL 10 DE FEBRERO DE 2021 A LAS  
14:00 H. A CELEBRARSE MEDIANTE LA PLATAFORMA DIGITAL  
MICROSOFT TEAMS.**

**---ORDEN DEL DÍA---**

1. Pase de lista y declaración de quórum.
- 2.-Estatus de solicitud de convalidación de estudios Ing. Germán de los Santos
- 3.- Estatus de estudiantes Generación 2019, respecto a su avance de tesis
- 4.- Renuncia de la Dra. Valeria Jordana González Coronel al cargo de secretaria de Actas del Comité Académico de la MIQ y nombramiento del nuevo secretario de actas.

**---ACTOS Y ACUERDOS---**

**UNO. PASE DE LISTA**

Siendo las 14:00 horas del miércoles 10 de febrero de 2021, en la plataforma digital Microsoft TEAMS, se reunieron los miembros del Comité la Academia de la Maestría en Ingeniería Química. Al momento de inicio de la reunión se cuenta con la asistencia de 4 (cuatro) miembros: Dra. Claudia Santacruz Vázquez, Dra. Valeria J. González Coronel, Dra. Nancy Tepale Ochoa, Dra. Verónica Santacruz estableciéndose quórum legal.

**DOS. ESTATUS DE SOLICITUD DE CONVALIDACIÓN DE ESTUDIOS ING. GERMÁN DE LOS SANTOS**

La Dra. Claudia Santacruz presenta la respuesta de la Dra. Esmeralda, que indica que en caso de aprobarse su reingreso, el estudiante deberá cursar materias y elegir un nuevo tema de tesis, por lo que se propone hacerle llegar esta respuesta al aspirante. Se integra el Dr. Alvaro Sampieri. Se pone a consideración la propuesta y se aprueba por unanimidad.

**3.- ESTATUS DE ESTUDIANTES GENERACIÓN 2019, RESPECTO A SU AVANCE DE TESIS**

La Dra. Claudia Santacruz presenta la respuesta de la Dra. Rosario Huesca, referente al acuerdo de la sesión pasada, en el cual expone que el comité académico puede validar el cambio de tema de tesis dada la situación extraordinaria que estamos viviendo a nivel global. La Dra. Claudia Santacruz da lectura a la carta de solicitud de Aval de cambio de tema de tesis de las estudiantes Silvana García Martínez y Metzner Morales González, por parte de la Dra. Nancy Tepale. La Dra. Claudia pone a consideración la aprobación del aval solicitado por la Dra. Nancy

Tepale. Se incorpora la Dra. Esmeralda Vidal Robles. Se aprueba por unanimidad la solicitud del Dr. Hector Ruiz y de la Dra. Nancy Tepale.

**4.- RENUNCIA DE LA DRA. VALERIA JORDANA GONZÁLEZ CORONEL AL CARGO DE SECRETARIA DE ACTAS DEL COMITÉ ACADÉMICO DE LA MIQ Y NOMBRAMIENTO DEL NUEVO SECRETARIO DE ACTAS.**

La Dra. Claudia Santacruz da lectura la renuncia de la Dra. Valeria González a la actividad de secretaria de actas, y se abre la propuesta al comité para nombrar nuevo secretario de actas, los miembros proponen a la Dra. Nancy Tepale, por unanimidad se aprueba su nombramiento.

Sin más por el momento se levanta la sesión a las 14:40 horas del día 10 de febrero de 2021.

**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**Facultad de Ingeniería Química**  
"Pensar Bien Para Vivir Mejor"






Dra. Claudia Santacruz Vázquez (presidenta)	
Dra. Valeria Jordana González Coronel	
Dra. Nancy Tepale Ochoa	
Dr. Álvaro Sampieri Croda	
Dra. Verónica Santacruz Vázquez	
Dra. Esmeralda Vidal Robles	

Figura 2. Acta de la Sesión Extraordinaria (continuación)

### III. REVIEW

#### **Modulación de propiedades tecnológicas de polímeros alimenticios por ultrasonido de potencia y su uso potencial como miméticos de grasa en alimentos bajos o reducidos en grasa**

Patricia Domínguez-Guerrero, Edith Corona-Jiménez, Genaro Gustavo Amador-Espejo, Héctor Ruíz-Espinosa

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería Química (FIQ). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Edificio 107, 14 Sur y Av. San Claudio, Ciudad Universitaria, C.P. 72570 Puebla, Puebla.

**Palabras claves:** Obesidad y sobrepeso, remplazantes de grasa, hidrocoloides, ultrasonido de potencia

#### **1. Introducción**

La obesidad y el sobrepeso son un problema creciente a nivel mundial y se consideran la principal causa de muerte, ya que se estima que esta condición provoca el deceso de 2.8 millones de personas. La Organización Mundial de la Salud (OMS) define como obesidad y sobrepeso a la acumulación anormal o excesiva de grasa que puede ser perjudicial para la salud y se diagnostica con el índice de masa corporal (IMC); así, para valores superiores a 25 kg/m es sobrepeso, y mayor a 30 kg/m es obesidad (WHO, 2020). En 2016, existían 1900 millones de adultos con sobrepeso y de ellos 650 millones presentaban obesidad (Iparraguirre et al., 2020). Para 2025, la WOF (World Obesity Federation) prevé que la prevalencia mundial de la obesidad alcance el 18% en los hombres y supere el 21% en las mujeres (WOF, 2020). Por otro lado, la OCDE (Organization for Economic Cooperation and Development) proyecta un aumento constante en los índices de obesidad y sobrepeso hasta 2030 al menos, con niveles de obesidad del 47%, 39% y 35% de la población en Estados Unidos, México e Inglaterra, respectivamente (OCDE, 2017). El desequilibrio energético es la principal causa del sobrepeso y la

obesidad; los contenidos excesivos de grasas y azúcares en ciertos alimentos tienden a acumularse como grasa en el organismo, lo cual se ve potenciado si la persona realiza poca o nula actividad física (WHO 2020; OECD 2019). Debido a la obesidad y el sobrepeso se ha observado un incremento en incidencias de diversas enfermedades crónicas degenerativas, entre las que se incluyen la diabetes, las enfermedades cardiovasculares y el cáncer. El incremento del IMC hace que las probabilidades de contraer estas enfermedades sean cada vez más altas (Kew et al., 2020; Meldrum et al., 2017). Para evitar un aumento de peso, la OMS recomienda que el consumo de grasas no debe superar el 30% de la ingesta total de calorías (Colla, 2018; WHO 2020). Las políticas implementadas en diversos países, en colaboración con autoridades sanitarias nacionales, incluyen el cobro de impuestos sobre las bebidas azucaradas y los alimentos no esenciales con alto contenido calórico, y el etiquetado frontal de advertencia en alimentos con el objetivo de que los consumidores sepan identificar fácilmente los productos que contienen cantidades excesivas de azúcares, sodio, grasas totales, grasas saturadas y grasas trans (Marangoni et al., 2020; Blüher 2019; Vargas-Meza, 2019). Otras acciones realizadas con la finalidad de reducir el sobrepeso incluyen el fomento del consumo de alimentos de origen vegetal como lo realizado a través de la campaña *5 al día* la cual es un movimiento de alcance mundial avalado por la OMS que promueve el consumo de un mínimo de 5 raciones de frutas y hortalizas al día como base de una dieta saludable, así como, el aumento de la actividad física (5 al día, 2021). Una de las estrategias potenciales para disminuir la ingesta de calorías de manera significativa es reducir la cantidad de grasa en los alimentos. Con la finalidad de cumplir con estas políticas, la industria alimentaria ha buscado reducir o sustituir total o parcialmente el contenido de grasa en sus productos. Sin embargo, las grasas no solo participan en el suministro de calorías y ácidos grasos esenciales, sino que también tienen un gran impacto en las propiedades sensoriales y reológicas de los alimentos (Sato & Ueno, 2014; Kolakowska & Sikorski, 2010). Desde el punto de vista tecnológico, las grasas contribuyen a muchas cualidades deseables de los alimentos, incluidos la liberación de sabor en chocolates y

productos de confitería (Talbot 2014), además mejora la textura, la estabilidad y fundabilidad en helados y favorece la sensación en boca en productos cárnicos y de panificación (Kumar 2021; Gutiérrez-Luna et al., 2020; Akbari et al., 2019; Colla et al., 2018; Smith, 2015; Wassell, 2014), entre otras. Las cualidades otorgadas por las grasas disminuyen una vez que se reduce o elimina la cantidad de grasa de los alimentos originales (Colla et al., 2018). Se han reportado diversos defectos en propiedades de calidad en varios productos alimenticios reducidos en grasa, incluyendo, la textura granular y quebradizo en helados (Akbari *et al.*, 2019), textura gomosa, sabores desagradable, baja capacidad de fusión y color indeseable en quesos (Ningtyas & Prakash, 2020; Tufeanu & Tița, 2016 ), en yogurt la reducción de grasa se asocia con la pérdida de viscosidad, sensación en boca y textura deficiente (Torres et al., 2018), mientras que en productos cárnicos la reducción de grasa conduce a un producto más firme, gomoso, menos jugoso y el rendimiento de cocción disminuye (Mallika et al., 2009). Las compañías dedicadas a la elaboración de alimentos se han visto en la necesidad de realizar cambios en la formulación de sus productos y en algunos casos se han hecho modificaciones en algunas etapas del proceso de elaboración; de esta forma se busca amortiguar los efectos negativos que resulten al reducir el contenido de grasa en los alimentos. La industria alimentaria y la comunidad científica ha buscado sustitutos de grasa que imiten las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de las grasas en los productos alimenticios. Por lo general, el uso de sustitutos de grasa implica el reemplazo directo de la grasa con una sustancia que intenta proporcionar propiedades similares a la grasa y que proporcionan pocas calorías (O'Connor & O'Brien, 2016). Los sustitutos de grasa utilizados pueden clasificarse según las sustancias de las que se derivan, hoy en día existen sustitutos a base de proteínas, carbohidratos, grasas o combinaciones de estas (Kumar 2021; Peng & Yao 2017). El efecto sobre la calidad en los alimentos depende principalmente del contenido de grasa, la distribución, la composición química y la reactividad, así como de los cambios físicos debido al procesamiento y las interacciones con otros componentes (Sacchi y Paolillo, 2007). Existe una amplia gama de sustitutos de grasa de los cuales

destacan diversos hidrocoloides como harinas de cereales (trigo, avena, maíz), almidones, gomas alimenticias (Colla et al., 2018; Peng & Yao, 2017), proteínas vegetales (Paglarini et al., 2020), caseinatos y concentrados de proteínas de leche y de suero, entre otras (Kew et al., 2020). Estos sustitutos de grasa pueden ser modificados estructuralmente, cambiando con ello su comportamiento tecnológico-funcional, mediante la aplicación de factores térmicos y emergentes no térmicos de procesamiento; entre estos últimos se incluyen alta presión hidrostática, técnicas de cizallamiento (homogeneización a alta presión, microfluidización), campos eléctricos pulsados y ultravioleta de onda corta (Barros et al., 2021; Chakka et al., 2021; Galanakis et al., 2021; Raghunathan et al., 2021; Guo & Shen, 2019; Pérez-Andrés et al., 2018); además, con este mismo propósito, recientemente se ha destacado el uso del ultrasonido de potencia (USP). El USP se define como un conjunto de ondas sonoras con un rango de frecuencia de 20 a 100 kHz (Yadav et al., 2014; Kentish & Ashokkumar 2011). El uso del USP se ha explorado intensamente en la actualidad debido a su versatilidad para la alteración, generación y modificación de microestructuras, sin el uso de aditivos o tratamientos térmicos. Se ha demostrado que la aplicación de USP puede modificar las características tecnológico-funcionales de distintos polímeros alimenticios (Alarcon et al., 2018). Por lo tanto, en esta revisión, se investigan los principales efectos del uso del USP, desde el punto de vista conformacional y funcional de ciertos ingredientes que actúan como sustitutos de grasa en diversos alimentos. La información proporcionada puede ayudar en el desarrollo de productos innovadores que satisfagan las necesidades y demandas de los consumidores y de las políticas actuales.

## **2. Funciones de grasa en alimentos**

La funcionalidad de cada ingrediente empleado en la elaboración de un alimento influye de manera significativa en aspectos sensoriales y tecnológicos (Jardines et al., 2020). Es por eso, que la variación que pueda existir de un componente en particular puede percibirse de forma negativa o positivamente, debido a la complejidad que existe en cada matriz alimenticia. La presencia de grasa en el

alimento es una cualidad deseable, ya que las grasas son los encargados del sabor, la textura, cremosidad, la sensación en boca y el aroma particular de muchos alimentos; de esta manera, favorece la palatabilidad de los productos y la aceptación general (Yashini et al., 2019; Kołakowska, & Sikorski, 2010). La fuente y la composición de grasa difiere entre cada alimento; sin embargo, la mayoría de las grasas comparten una estructura química similar, que a menudo se clasifica como triacilglicerol (TAG) (Peng & Yao, 2017). Los TAG son ésteres de glicerol con tres moléculas de ácidos grasos. Un ácido graso es una biomolécula formada por una cadena de átomos de carbono, que, dependiendo de la fuente, difieren principalmente en función de la longitud de la cadena, grado de saturación y la isomería del doble enlace (Rogers, 2018). El punto de fusión de una grasa dependerá de la longitud y el número de saturación que presente, ya que, mientras mayor sea la saturación y la cadena sea más larga el punto de fusión de las grasas será más alto (Marangoni, 2012). Los atributos sensoriales y funcionales proporcionados por las grasas en los alimentos, no solo depende de la concentración, sino que también de las interacciones entre componentes, las propiedades térmicas (punto de fusión y cristalización), el tamaño y forma molecular, así como, del comportamiento del producto durante y después de cada etapa de procesamiento, y posteriormente de la estabilidad física (migración o separación de grasas) y química (rancidez u oxidación) durante el almacenamiento y distribución (Silva Lannes & Maria, 2013). Las grasas forman cristales polimórficos específicas que controlan las propiedades físicas de las grasas presentes en alimentos, razón por la cual, es de suma importancia conocer los diferentes mecanismos de cristalización, así como de las propiedades reológicas y de textura que están dominadas principalmente por redes de cristales y la influencia de factores internos y externos sobre ellos (Sato & Ueno, 2014). La formación de redes tridimensionales a partir de la cristalización de grasas determina en gran medida la consistencia, la estabilidad física y la apariencia particular de ciertos alimentos, como el chocolate, los recubrimientos de confitería, los productos lácteos y la mantequilla (Wagh & Martini, 2017). La liberación gradual de sabor y aroma deseables que se origina al

masticar los alimentos se debe a la presencia de grasa; es por eso, que al reducir el contenido de grasa los sabores ácido, salado y amargo son más pronunciados (Emadzadeh & Ghorani 2015). Durante la cocción, las grasas permiten una buena transferencia de calor, permitiendo un calentamiento más rápido y el desarrollo de sabores. En productos cárnicos, la grasa también actúa como relleno, evitando que se encoja al cocinar (Mattice & Marangoni, 2019), razón por la cual, se tiene dificultades tecnológicas cuando se reducen los niveles. En la tabla 1 se resumen las principales funciones que tienen las grasas en diversos tipos de alimentos.

### 3. Reemplazantes de grasas en alimentos

#### Clasificación de reemplazantes de grasas

El desarrollo de alimentos bajos en grasas es hoy en día una prioridad para la industria alimentaria. Para los productores de alimentos compensar estos atributos otorgados, en alimentos reducidos en grasas es una tarea difícil; a pesar de ello, se han encontrado alternativas viables que permiten cumplir con la satisfacción de los consumidores, y una de ellas es el uso de reemplazantes de grasa, las cuales se pueden clasificar de la siguiente forma (O'Sullivan, 2016):

- **Sustitutos de grasa:** Son macromoléculas parecidas a las grasas, por lo general tienen una estructura química similar, pero se sintetizan químicamente o vía enzimática (Yashini, 2019). Son resistentes a la hidrólisis por enzimas digestivas (Chavan et al., 2016). Los sustitutos de grasa reemplazan directamente la grasa presente en los alimentos, es decir, su reemplazo es peso por peso (Rogers, 2019). El aporte calórico es bajo y en algunos casos no existe aporte de energía. Son moléculas termoestables, conveniente para su uso a altas temperaturas. Su uso se debe a que pueden conservar la textura y sensación en boca de la grasa (O'Connor & O'Brien, 2011). A su vez, los reemplazantes de grasa se subdividen en; (1) reductores calóricos, que reemplazan una fracción de todas las grasas presentes, por ejemplo; el Olestra y los carbohidratos no digeribles y (2) reemplazantes de

grasas duras, que solo remplazan una fracción de las grasas trans (Rogers, 2019).

- **Miméticos de grasa:** también conocidos como *agentes texturizantes*. Son moléculas que pueden reproducir algunas de las propiedades tecnológico-funcionales y sensoriales de las grasas originales (Colla et al., 2018; Chavan et al., 2016). Generalmente, los miméticos de grasas son ingredientes a base de proteínas o carbohidratos, que requieren la incorporación de un alto contenido de agua para alcanzar la funcionalidad deseada (Rogers, 2018). El aporte calórico es bajo ya que varía de 1 a 4 kcal/g y generalmente son termolábiles (Patel, 2020; Yashini et al., 2019).

## **Principales remplazantes de grasa empleados en alimentos**

### ***Sustitutos de grasas a base de lípidos***

Los sustitutos de grasa a base de grasa son compuestos que tienen el mismo comportamiento que las grasas originales; la apariencia física es similar, sin embargo, el aporte calórico es menor. Su sustitución es directa por lo que no se requiere reformular el producto. En esta clase de sustitutos podemos encontrar emulsionantes, triacilgliceroles de cadena media, lípidos estructurados y lípidos acalóricos (Arkari et al., 2019). A continuación, se describen brevemente y en la Tabla 2 se resume sus principales funciones como remplazantes de grasa a base lípidos en diversos alimentos

### **Olestra**

La Olestra (Olean, nombre comercial) es el primer sustituto de grasa aprobado por la FDA (Food and Drug Administration) en 1996. Es un poliéster de sacarosa, formados a partir de ácidos grasos de cadena larga (Hexa, hepta y octa) (Figura 1); extraídos y aislados de aceites comestibles de soja, oliva, canola, maíz y girasol (Elangkovan & Ganapathy, 2020). Se sintetiza interesterificando sacarosa

y ésteres metílicos de aceite comestibles en presencia de un catalizador alcalino a una temperatura de entre 100 a 140 °C. Es una molécula similar a una grasa, pero la cantidad de calorías proporcionadas es menor. Las lipasas gástricas y las bacterias producidas en el colon no poseen la capacidad de romper los ácidos grasos del éster de sacarosa, por lo que no son absorbidas en el tracto intestinal, sino que se excretan en las heces (Zam, 2020; Rogers, 2018). La Olestra tiene la sensación en boca, apariencia, punto de fusión, estabilidad térmica y estabilidad oxidativa de las grasas convencionales (O'Connor & O'Brien, 2011). La funcionalidad de la Olestra va a depender de la longitud de la cadena y de los ácidos grasos esterificados a sacarosa, ya que, si los ácidos grasos altamente insaturados se esterifican a sacarosa, la Olestra resultante será fluida y si la cadena está saturada esta será sólida. La Olestra se ha utilizado en productos como helados (Zheng et al., 2015), mantequilla (Zam, 2020), queso y productos horneados. Además, puede soportar altas temperaturas, adecuado para su uso en productos fritos (Baruah & Bhattacharyya, 2017; Artz et al., 2007). La principal desventaja de la Olestra es que interfiere en la absorción de vitaminas liposolubles (A, D, E y K) carotenoides y de algunos fitoquímicos (Zam, 2020).

### **Caprenina**

La Caprenina o triacilglicérico caprocaprilobehénico fue uno de los primeros lípidos desarrollado por Procter & Gamble por medio de una tecnología no enzimática (Smith, 2015), además, cuenta con la aprobación GRAS de la FDA desde 1996 (Valenzuela & Sanhueza, 2008). La Caprenina es un triglicérido que se sintetiza a partir de la esterificación del glicerol con una mezcla de ácidos grasos de cadena medía (caprílico, cáprico) y un ácido graso de cadena larga (behénico), que se distribuyen aleatoriamente en todo el esqueleto del glicerol (Goswami et al, 2019). En la Figura 2 se observa la estructura molecular de la Caprenina. Los ácidos grasos utilizados provienen del aceite de coco, palma y colza. El aporte calórico es de aproximadamente 5 kcal/g, esto se debe a que el ácido behénico solo se absorbe parcialmente en el intestino y el ácido caprílico y cáprico se metabolizan fácilmente. En la industria alimentaria, la Caprenina se utiliza para la elaboración de helados,

aderezos para ensaladas, mayonesa, cremas para untar, leche y quesos (Smith, 2015). Las propiedades funcionales de la Caprenina son análogos a las de la manteca de cacao, razón por la cual se utiliza en coberturas de confitería y caramelos blandos (Zam, 2020), como barras de caramelo (Rogers 2018; O'Connor, 2011). Sin embargo, la Caprenina no está diseñada para usarse en glaseados, mezclas de bebidas o chocolate para hornear (Lucca 1994). La Caprenina no se puede utilizar para freír alimentos.

### **Salatrim**

El Salatrim (conocido comercialmente como Benefat), pertenece a un grupo de triacilgliceroles estructurados, que se obtiene mediante la interesterificación catalizada por bases de aceites vegetales hidrogenados de canola o soya con triacilgliceroles, fue desarrollada y comercializada por Cultor Food Science Inc. (Ardsley, N.Y.) (Shahidi & Senanayake, 2007). El Salatrim consta de ácidos grasos de cadena corta (ácido acético, propionato y/o butírico) y un ácido graso saturado de cadena larga (ácido esteárico) (Figura 3) (Rogers, 2018). El Salatrim posee el sabor, la textura y las propiedades tecnológico-funcionales de las grasas y aceites convencionales, aunque su aporte calórico es de alrededor de 5 kcal/g; esto se debe a que los ácidos grasos de cadena corta se hidrolizan fácilmente por las lipasas digestivas y se convierten en dióxido de carbono y el ácido esteárico solo se absorbe parcialmente (Richards, 2005). El Salatrim fue diseñado principalmente como sustituto de la manteca de cacao (Rogers, 2018); sin embargo, su uso en revestimientos y rellenos para repostería y productos horneados, cremas de cacahuate, aderezos y salsas, productos lácteos como nata, postres lácteos y queso (Fellows, 2017), ha aumentado gracias a la capacidad que tiene para emulsionar, estabilizar, texturizar, lubricar y actuar como portador de sabor (O'Sullivan, 2016), además de funcionar eficazmente en alimentos con bajo contenido de humedad (Shahidi & Senanayake, 2007). El Salatrim, al igual que la Caprenina no se puede utilizar a altas temperaturas, debido a que los ácidos grasos de cadena corta son propensos a la hidrólisis tras la exposición al calor intenso, originando sabores indeseables (Zeece, 2020).

## **Sorbestrin**

La Sorbestrin o Poliéster de sorbitol, es una mezcla de tri-, tetra- y pentaésteres de sorbitol y anhídridos de sorbitol con ácidos grasos (Figura 4) (Goswami, et al., 2019). Fue descubierto por Pfizer Food Science Group y actualmente es desarrollado por Danisco Cultor America Inc. (Ardsley, Nueva York) (Shahidi & Senanayake, 2007). La Sorbestrin se fabrica mediante la transesterificación catalizada de sorbitol con ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos derivados de aceites vegetales como aceite de soya, girasol, cártamo o aceite de semilla de algodón (Auerbach et al., 2001). La Sorbestrin es un líquido de color amarillo transparente con sabor y olor suave a aceite, y con un punto de enturbiamiento de entre 13 °C a 15 °C (Akoh, 2007). El aporte calórico es de aproximadamente 1.5 kcal/g, ya que la Sorbestrin se absorbe parcialmente y la porción absorbida se metaboliza por completo. Debido a la estabilidad térmica que presenta, está diseñado para su uso en productos horneados y para freír; además, se usa también en aderezos para ensaladas, salsas, margarina, mayonesa y pastas para untar, coberturas, dulces, pudines y rellenos y sopa (Auerbach et al., 2001). Sin embargo, al no ser un producto aprobado por la FDA aún no está disponible comercialmente (Bechtel, 2014).

**EPG: Esterified Propoxylated Glycerol** (*Gliceroles Propoxilados Esterificados*)

Los gliceroles propoxilados esterificados (EPG: por sus siglas en inglés) son triglicéridos modificados, que se sintetizan por reacción del glicerol con óxido de propileno para formar un poliéter polioliol que posteriormente se esterifica con ácidos grasos (Figura 5) (O'Connor & O'Brien 2016). Los EPG fueron desarrollados por ARCO Chemical Company en 1980 (Bechtel, 2014) y tienen la misma estructura y apariencia de los triglicéridos. Sin embargo, las moléculas se encuentran modificadas, de tal forma que se hacen resistentes a la hidrólisis enzimática y no son absorbidas por el cuerpo (Chavan et al., 2016; Akoh, 2007). Al ser resistentes a las lipasas, el aporte calórico es bajo, menor a 1 kcal/g (Bechtel, 2015; Christian,

& Bechtel, 2014). Las propiedades físicas y tecnológico-funcionales de los EPG dependen del tipo de ácidos grasos esterificados utilizados (Akoh, 2002), siendo los más comunes los ácidos C14-C18, de fuentes como el maíz, aceituna, soya, manteca de cerdo y sebo (Shahidi & Senanayake, 2007). Los EPGs son termoestables y se puede utilizar en productos para hornear y freír, además, pueden sustituir a las grasas en diversos productos incluyendo margarinas, helados, aderezos para ensaladas, pasta para untar y productos de panadería (O'Connor & O'Brien 2016).

### **Miméticos de grasa a base de proteínas**

Los miméticos de grasa a base de proteínas se producen a partir de proteínas vegetales y animales (Yashini et al., 2019), como las de huevo, leche, suero, soya, maíz o trigo (Sun & Fang, 2021). Estos miméticos tienen la capacidad de imitar la funcionalidad de la grasa en los alimentos (Rogers, 2018), gracias al tamaño (0.1-2.0 mm) y a la forma esférica de las proteínas, que son similares a las gotas de aceites presentes en las emulsiones alimentarias (Zeece, 2020; Chavan et al., 2016). Los miméticos de grasa a base de proteína, son ingredientes aceptados debido a las múltiples propiedades nutricionales y funcionales, incluida las capacidades de solubilidad, fijación de agua, emulsificación, gelificación, fijación de grasas y sabores, espumante, así como su habilidad de modificar textura y viscosidad en los sistemas alimentarios (Kwon et al., 2021; Nasrabadi, 2021). Sin embargo, estas propiedades tecnológico-funcionales de las proteínas pueden afectarse por diferentes factores tales como la composición de la matriz alimenticia, la interacción con otras moléculas, los métodos de procesamiento, la incorporación de aditivos, el pH, la temperatura y la presión, entre otros (Pathania et al., 2019; Li-Chan & Lacroix, 2018). Para que las proteínas actúen como miméticos de grasas es necesario la formación de complejos proteína-proteína y proteína-carbohidrato, así como, la formación de una emulsión estabilizada de proteínas y carbohidratos (Yashini et al., 2019). Los miméticos de grasa a base de proteínas presentan dos principales inconvenientes: 1) no pueden usarse como aceites de cocina o en productos para freír, ya que las altas temperaturas desnaturalizan y coagulan las

proteínas (Leman, 2007), y 2) tienden a unirse químicamente a otros componentes, haciendo que contribuyan al sabor o que pierdan intensidad (Lucca & Tepper, 1994). Los miméticos de grasa a base de proteínas se utilizan en productos lácteos bajos en grasa, postres, margarinas, mayonesa, salsas, aderezos para ensaladas, productos cárnicos y productos de panadería (Kumar et al., 2018; Fellows, 2017). El aporte calórico es relativamente bajo ya que son parcial y/o completamente digeribles como proteína y, por lo tanto, tiene un valor calórico de 4 kcal/g (O'Connor & O'Brien, 2011). El uso de los miméticos de grasa base de proteína no solo reduce el contenido de grasa y la densidad calórica de los alimentos, sino que también les da un valor agregado a los productos alimenticios, ya que, aumenta el contenido de proteína en los alimentos que son absorbidos por el cuerpo, y además son percibidos como ingredientes más naturales que mejoran la calidad, el valor nutricional y funcional de los alimentos, cualidades que todo consumidor consciente busca. Los principales remplazantes a base de proteínas se comercializan bajo los nombres Simplese®, Trailblazer®, Finesse®, entre otros y están elaborados de proteína de suero microparticulada (Yashini et al., 2019; O'Sullivan, 2016). A continuación, se describe brevemente los principales miméticos de grasas a base de proteínas de origen animal y vegetal. En la Tabla 3 se resume las principales funciones de los remplazantes de grasa a base de proteína animal en diversos grupos de alimentos.

### **Proteína de leche**

La leche es un fluido muy complejo que se compone principalmente de agua, lípidos, lactosa y proteínas, además de vitaminas y minerales a nivel trazas (Goulding, 2020). A pesar de no ser el componente mayoritario, las proteínas juegan un papel muy importante en las propiedades tecnológico-funcionales de la leche y de la mayoría de los productos lácteos, y dada su versatilidad, se ha explorado su uso como miméticos de grasa a base de proteína en diversos alimentos. Las proteínas de la leche utilizadas como sustitutos se presentan deshidratadas, con diversos tratamientos previos que les brinda características únicas y con diversas concentraciones proteica (USDEC, 2021), por lo que cada una de ellas ofrece

diferentes beneficios para la industria alimentaria y para los consumidores. Dentro de los ingredientes de proteína de leche se encuentra los *concentrados de proteína de leche (MPC)*, que contienen caseínas y proteínas de suero en la misma proporción que en la leche original y con un perfil de aminoácidos similar (Sunkesula et al., 2021; ADPI, 2021). El contenido proteico está disponible en concentraciones de proteína que va del 40% hasta 90% (p/p) (Patel et al., 2020), pero si la concentración de proteína excede este límite superior se conoce como *aislado de proteína de leche (MPI)*. En la Tabla 4 se presentan las composiciones promedio de los MPC y MPI dadas por la USDEC (U.S. Dairy Export Council) y ADPI (American Dairy Products Institute). Para los MPC, a medida que aumenta el contenido de proteína, disminuyen los niveles de lactosa; por ejemplo, un MPC que contiene 42% de proteína, posee 46% de lactosa, mientras que un MPC con 80% de proteína tiene solo el 9% de lactosa (Patel et al., 2014).

Los MPC y MPI se fabrican a partir de leche descremada, que se somete a un tratamiento térmico (70-75°C por 10 a 20 s), para la inactivación de microorganismo y de algunas enzimas. Posteriormente, la leche se concentra por ultrafiltración, para que la lactosa, las sales y el nitrógeno no proteico se elimine con el permeato. Sin embargo, cuando se desea elevar el contenido proteico en el producto la ultrafiltración no es suficiente, por lo que emplean una etapa adicional conocida como diafiltración con la finalidad de eliminar los restos de lactosa y minerales solubles. Por último, el retenido de la ultrafiltración o diafiltración, se evapora y se seca por aspersion; el producto final tendrá la relación de proteína sólida deseada (Sunkesula et al., 2021; Patel et al., 2020; Lagrange et al., 2015; Patel et al., 2014). En la actualidad, los MPC se utilizan en diversos productos como emulsionantes, potenciadores del sabor, agentes aromatizantes, coadyuvantes de formulación, humectantes, estabilizadores y espesantes y texturizantes (USDEC, 2021; ADPI, 2021, Patel et al., 2020; McSweeney et al., 2020), para obtener alimentos ricos en proteínas de alta calidad y bajos en lactosa y grasa (Mostafavi et al., 2017). Una de las propiedades tecnológico-funcionales de los MPC, es la capacidad de emulsión, ya que imitan las propiedades morfológicas de las gotas de

grasas emulsionadas, haciendo que las proteínas agregadas se hidraten y puedan retener humedad. Esta propiedad se determina a partir del tamaño de partícula de las gotas de emulsión que se generan a una concentración de proteína dada en condiciones definidas (Ye, 2011). Sin embargo, para obtener una emulsión estable con gotas más grandes de grasas emulsionadas, se requieren concentraciones mucho más altas de MPC, característica que limitado su aplicación en algunos alimentos (Meena et al., 2017; Uluko et al 2016). Por otra parte, los MPC pueden emplearse como mejoradores de sabor, textura y rendimiento en productos como sopas y salsas, helados, quesos de pasta hilada (Oaxaca y mozzarella reducido en grasa), quesos madurados selectos (Cheddar) productos cárnicos y en productos para untar bajos en grasa (USDEC, 2021; ADPI, 2021; Omrani et al., 2020; Uluko et al., 2016; Patel et al., 2014; Caro et al., 2011; Francolino et al., 2010; Rehman et al., 2003). En helados se ha demostrado que al incorporar MPC se obtiene un producto con mayor viscosidad en la mezcla, sensación en boca, suavidad, firmeza y bajo en grasa, además de obtener curvas de fusión del hielo más estrechas y mayor retención de forma y con un contenido de proteína mayor (Mostafavi et al., 2017; Patel et al., 2006; Álvarez et al., 2005). Los MPC se identifican añadiendo la concentración proteica promedio al nombre comercial siendo los más comunes los MPC42, MPC56, MPC70, MPC75, MPC80, MPC85 y MPI; el costo y la funcionalidad varía dependiendo de cómo se producen y del porcentaje de proteína disponible (USDEC, 2021). Algunos fabricantes y proveedores de MPC y/o MPI incluyen a; California Dairies, Inc. (EE. UU.); Dairy Farmers of America (EE. UU.); Darigold, Inc. (Estados Unidos); Productos Lácteos de Idaho (EE. UU.); NZMP (Fonterra, Nueva Zelanda), Friesland Campina (Holanda), Agropur (Quebec, Canadá), Arla Foods (Viby, Dinamarca) (USDEC, 2021; ADPI, 2021).

### **Concentrado de caseína micelar (MCC)**

Las caseínas (CN) son fosfoproteína presente en la leche y representan el 80% de la proteína total (Corredig et al., 2019; Carr & Golding, 2016). Las CN se encuentran en forma de coloides de asociación llamadas micelas de caseína. Una micela de caseína contiene aproximadamente 104 moléculas de caseínas

individuales unidas por fosfato de calcio coloidal (Huppertz et al., 2018; Augustin et al., 2011). La función principal de la micela de caseína es proporcionar fluidez a las moléculas de caseína y servir como medio de nanotransporte de fosfato de calcio (Bhat et al., 2016). La CN consta de cuatro fracciones de proteína;  $\alpha_{s1}$ -CN,  $\alpha_{s2}$ -CN,  $\beta$ -CN y  $\kappa$ -CN (38, 10, 36 y 12% de CN, respectivamente) (Hamman et al., 2021), siendo la  $\alpha$ -CN la fracción principal (Dmour & Taha, 2018; Augustin et al., 2011; Fox y Kelly 2004;). A pesar de formar parte de una sola unidad, las proteínas presentan diferentes secuencias de aminoácidos y posición, además cada una realiza una función específica, en la que algunas están involucradas en el transporte de fosfato de calcio mientras que otras en la estabilidad de la micela, en particular  $\kappa$ -CN (Horne, 2020; Chen et al., 2019; Huppertz et al. 2018). La caseína se obtiene generalmente a partir de la leche descremada y mediante diferentes métodos químicos, razón por la cual existen cuatro tipos de productos de caseínas disponibles en el mercado, tales como: caseína de cuajo (obtenida por métodos enzimáticos), caseína ácida (acidificación de la leche descremada hasta el punto isoeléctrico), coprecipitados (por calentamiento y precipitación del complejo caseína-proteína de suero, usando cloruro de calcio) y los caseinatos (obtenido a partir de caseína ácida disuelta en hidróxido de sodio). Estos métodos destruyen el estado nativo de las micelas de caseína y del mismo modo reduce sus propiedades funcionales (Zhang et al. 2008). Sin embargo, hoy en día la microfiltración se ha utilizado para producir un nuevo ingrediente llamado concentrado de caseína micelar (MCC) (Hamman et al., 2021); a diferencia de los productos anteriores no se necesita generar la ruptura parcial o total de la micela de caseína. El MCC se fabrica mediante microfiltración de la leche descremada utilizando una membrana (0.1-1  $\mu\text{m}$ ) que permite la filtración de las proteínas de suero, los componentes solubles y los compuestos nitrogenados de bajo peso molecular, conservando las micelas de caseína intactas (Yang et al., 2021; Crowley et al., 2018; O'Regan & Mulvihill, 2011). Posteriormente la fase retenida se seca por aspersion. El porcentaje presente de proteína va del 85-95%; cada producto se identifica con un número que representa el contenido de proteína de ese producto. En la tabla 4 se muestra la

composición general del MCC80, MCC85 y MCC90 (USDEC, 2021; Patel, 2020; Crowley et al., 2018). Los MCC obtenidos presentan una estructura anfifílica, abierta y flexible (Beliciu et al., 2012), además de ser térmicamente estable por encima de 80°C (USDEC, 2021). La capacidad de formación de espuma, emulsionante y aglutinante hace posible su uso como agente estabilizante de algunas propiedades físicas de carnes procesadas, productos horneados, dulces, cereales, helados, cremas batidas, blanqueadores de café y algunos productos alimenticios dietéticos, así como ingrediente en bebidas y batidos que se pueden conservar a temperatura ambiente, incluyendo productos lácteos fortificados, proporcionando al cuerpo aminoácidos esenciales (Schäfer et al., 2021; USDEC, 2021; Belitz et al., 2009). Asimismo, los MCC se han utilizado ampliamente como remplazantes de grasa en diversos productos alimenticios bajos y/o reducidos en grasa mejorando la unión de grasa y agua, las propiedades de textura y las propiedades sensoriales (USDEC, 2021; Yashini et al., 2019)

### **Proteína de suero lácteo**

Las proteínas de suero de leche se obtienen comúnmente del *suero lácteo dulce*, un subproducto de la elaboración de los quesos coagulados enzimáticamente (Patel et al., 2020). Sin embargo, en la actualidad existen tres fuentes de proteína de suero relativamente nuevas y en evolución, las cuales son: 1) *suero ácido* obtenido de la elaboración de productos acidificados, 2) *suero nativo* obtenido de la microfiltración de leche descremada y 3) *suero griego* recuperado durante el proceso de separación de la elaboración tradicional de yogur griego (Wang & Guo. 2019; Lagrange et al., 2015). Las proteínas presentes en el suero se separan y concentran mediante el uso de diferentes técnicas de fraccionamiento para eliminar todos los compuestos no proteicos y de esta manera garantizar que el producto final tenga más del 25% de proteína (Wang & Guo. 2019; Becenetti et al., 2018). Dependiendo de la cantidad de suero que se concentre, se obtienen dos productos mayormente comercializados; 1) *concentrado de proteína de suero (WPC)*, se fabrica mediante el uso de diafiltración y ultrafiltración de suero a rangos bajos de pH y temperatura y cuyo porcentaje de proteína varía del 33.5% al 82% (USDEC,

2021), y 2) *aislados de proteína de suero (WPI)*, que se fabrican a partir del uso de técnicas de cromatografía de intercambio iónico o microfiltración; este producto requiere una mayor reducción de lactosa y grasa para aumentar la proporción de proteína a más del 90% (Mehla et al., 2020; Patel et al., 2020; Kelly, 2019). Cabe mencionar que, ambos productos se producen mediante secado por aspersión. La tabla 4 muestra la composición promedio de WPCs y WPI (ADPI, 2021; USDEC, 2021). La Figura 6 señala las diferentes técnicas empleadas en el procesamiento y producción de WPC y WPI.

Las proteínas presentes en los WPC y WPI incluye principalmente la  $\alpha$ -lactoalbúmina ( $\alpha$ -LA) y  $\beta$ -lactoglobulina ( $\beta$ -LG), con una contribución del 20% y 50-60%, respectivamente; otras proteínas minoritarias incluyen a las inmunoglobulinas y la albúmina bovina sérica (Guo & Wang, 2019). En la industria alimentaria, al ser las proteínas séricas presentes en mayor concentración,  $\alpha$ -LA y  $\beta$ -LG poseen una gran influencia en el comportamiento tecnológico de diversos productos; así,  $\beta$ -LG y  $\alpha$ -LA al ser moléculas anfifílicas se adsorben en las interfaces aceite-agua y son capaces de producir emulsiones estables (Wang et al., 2019; Dickinson, 2015; Kim et al., 2005), por ejemplo. Las proteínas de séricas poseen características nutritivas y tecnológicamente funcionales para diversas aplicaciones alimentarias, ya que no solo contribuyen sensorialmente, sino que puedan afectar la calidad del alimento debido a su solubilidad, viscosidad y a sus capacidades de gelificación, emulsificación, formación de espuma y retención de agua, propiedades que depende primordialmente de su sensibilidad a factores extrínsecos, lo cual afecta en gran medida su utilidad en los sistemas alimentarios (Mehla et al., 2020; Wang et al., 2019; Bansal & Bhandari, 2016; Dissanayake et al., 2010). Las proteínas de suero se han utilizado ampliamente en productos horneados, bebidas, dulces, productos lácteos, productos cárnicos, aderezos para ensaladas, productos nutracéuticos, salsas y sopas (ADPI, 2021, USDEC, 2021; Patel et al., 2020; Chavan et al., 2016). Unas de las principales aplicaciones tecnológico-funcionales de los WPC y WPI es que son ingredientes utilizados como remplazantes de grasa (Yashini et al., 2019; Chavan et al., 2016). Las proteínas de suero presentan dos

ventajas importantes sobre las grasas; 1) el aporte calórico es de 4 kcal/g, mucho menor que el de la grasa (9 kcal), y 2) han demostrado ser más efectivas para inducir la saciedad que los carbohidratos y las grasas, y de esta manera reduce la ingesta de alimentos (Wang et al., 2019; Chung et al. 2014). Los sustitutos de grasa a base de proteína de suero están disponibles en el mercado y se promueven como productos bajos en grasa. Algunos de estos ingredientes se comercializan como proteínas de suero microparticuladas (MWP). La microparticulación es un proceso de agregación termomecánica, la cual implica un tratamiento térmico para producir la desnaturalización de las proteínas y la formación de agregados, y la aplicación simultánea de fuerza de corte para controlar y obtener un tamaño de partículas de 0.1-10  $\mu\text{m}$  (Hossain et al., 2020; Ipsen, 2017; Chung et al., 2014). La microparticulación de las proteínas de suero mejora las propiedades tecnológico-funcionales antes mencionadas, motivo por el cual se han utilizado ampliamente como miméticos de grasa, brindando una mejor textura, suavidad y cremosidad a una diversos productos (O'Connor & O'Brien, 2021), como el yogurt, helado (Guldiken et al., 2021; Olivares et al., 2019; Yashini et al., 2019; Sun et al., 2015), aderezos, salsas, postres (Patel et al., 2020; Ipsen, 2017) y quesos (Sánchez-Obando et al., 2020), entre otros. A continuación, se presentan ejemplo de varios miméticos de grasa a base de proteína de suero que se utilizan en la industria alimentaria y sus aplicaciones.

### **Simplesse®**

Simplesse® es un ingrediente multifuncional elaborado a partir de concentrado de proteína de suero, que se somete a un proceso de microparticulación para obtener partículas de proteínas uniformes, esféricas y deformables, parecidas a los glóbulos de grasa, con un tamaño que va del 0.1 a 3  $\mu\text{m}$ . Simplesse® fue desarrollado y fabricado por CP Kelco y es el primer reemplazante de grasa a base de proteína (Chavan et al., 2016). Inicialmente, Simplesse® fue aprobado como agente espesante y texturizantes para postres congelados, ahora se usa en una variedad de alimentos y bebidas bajos, reducidos y sin grasa (Shi et al., 2021). El uso de Simplesse® no compromete los atributos

sensoriales, debido a que las micropartículas presentes se comportan igual a los glóbulos de grasa, proporcionando cuerpo, textura y sensación en boca a diversos alimentos, a su vez contribuye a la cremosidad, viscosidad y opacidad, inhibe la sinéresis y aumenta la capacidad de retención de agua (Silva & O'Mahony, 2018). Se utiliza en productos lácteos (yogurt, quesos blandos, quesos para untar y crema agria) (Shi et al., 2021), productos para untar, productos de panadería, aderezos para ensaladas, salsas, mayonesa, glaseados (Hossain et al., 2020; O'Connor & O'Brien, 2011; Senanayake & Shahidi, 2005). El aporte calórico es de 1-2 kcal/g (da silva Lannes & Do Amaral, 2015; Chung et al., 2014) por ejemplo, en helados 1 gramo de Simplese® puede remplazar 3 g de grasa, para un ahorro de 23 calorías y 1 g de Simplese puede remplazar 3 g de grasa en crema. (Baruah & Bhattacharyya, 2017; Jones & Jonnalagadda, 2006). Simplese®, así como otras proteínas micropartículas no se pueden usar en alimentos fritos ya que el calor excesivo hace que las proteínas presentes se coagulen y pierdan su sensación en boca (Shand, 1997). Otra de las limitaciones de la Simplese® es que su costo es elevado. La FDA (Food and Drug Administration) le otorgo el estatus GRAS para su aplicación en postres congelados en febrero de 1990 y en 1991 para su uso en queso, aderezos y mayonesa (Cheftel & Dumay, 1993).

### **Dairy-Lo ®**

Dairy-Lo® es un polvo de color crema de olor y sabor característicos, con un contenido proteico mínimo de 34%, se utiliza como proteína funcional y remplazante de grasa en ciertos alimenticias. Dairy-Lo® fue desarrollado Pfizer Inc. (Groton, Connecticut) (O'Connor & O'Brien, 2011; Omayma & Youssef, 2007) y se fabrica utilizando un concentrado de proteína de suero ultrafiltrado a pH 6, que pasa por un proceso térmico (80°C, 17 s) para lograr una desnaturalización proteica del 60 al 80% (Yashini et al., 2019). Esta desnaturalización parcial le permite conservar muchas de sus propiedades funcionales como las de retención de agua y emulsificación, por ello tiene la capacidad de interactuar con el agua, proteínas y compuestos de sabor para prevenir la formación de cristales de hielo, así como,

proporcionar opacidad, controlar la viscosidad, estabilizar las celdas de aire y controlar la emulsificación (Prindiville et al., 2000). Sus propiedades tecnológico-funcionales facilitan su uso como mimético de grasa en productos como crema agria, postres lácteos congelados, quesos (Lai et al., 2020; O'Sullivan, 2020; Tahereh et al., 2017; Ertekin & Guzel-Seydim, 2010; Zalazar et al., 2002), productos horneados, yogures (Yashini et al., 2019; Yazici & Akgun, 2004) y salsas (Kumar et al., 2018; Chavan et al., 2016) con un aporte calórico de 4kcal/g. Estos productos presentan mayor elasticidad, firmeza, sabor, masticabilidad y gomosidad bajos en grasa. Dairy-Lo tiene el estatus GRAS por la FDA.

### **Colágeno**

El colágeno es una proteína fibrosa de origen animal, que contiene más del 30% de proteína total y se puede obtener a partir de vértebras de bovinos, porcinos y de peces (Sionkowska et al., 2017; Schmidt et al., 2016; Gómez-Guillén et al., 2011). El colágeno se encuentra mayoritariamente en todos los tejidos conectivos, incluida la piel, los huesos, los cartílagos, los tendones y en los vasos sanguíneos de los animales (Nasrollahzadeh et al., 2021, Yashini et al., 2019); se obtiene mediante hidrólisis química o enzimática, siendo la más usada la química por ser la más económica. Sin embargo, la hidrolisis enzimática presenta mayores ventajas sobre la química, ya que genera menos desperdicio, el tiempo de proceso es menor y se obtienen productos con mejor valor nutricional y funcional, aunque es un proceso costoso. La extracción de colágeno es compleja, ya que involucra la eliminación de enlaces cruzados covalentes intra e intermoleculares, que involucran residuos de lisina e hidroxilisina, enlaces éster y otros enlaces con sacáridos. La extracción consta de un pretratamiento mediante un proceso ácido o alcalino (dependiendo del origen de la materia prima) (Nasri, 2019) para eliminar sustancias no colágenas e incrementar el rendimiento, seguido de la extracción con soluciones salinas neutras, ácidas o ácidas con enzimas añadidas; la solución utilizada será de acuerdo con la solubilidad del colágeno (Schmidt et al., 2016; Ran & Wang, 2014). Los tipos de colágeno más abundantes son el tipo I, II y III y son los responsables de la resistencia, elasticidad y capacidad de retención de agua en los tejidos, siendo

el más común el colágeno tipo I, que consta de tres cadenas polipeptídicas, dos de las cuales son idénticas, que se denominan cadena  $\alpha 1$  (I) y  $\alpha 2$  (I) (Nasri, 2019; Gelse et al., 2003), y están compuestas por diferentes aminoácidos; su importancia radica en que se utiliza como ingrediente funcional en la industria alimentaria, farmacéutica, cosmética, entre otros (Santana et al., 2020; Hashim et al., 2015). Estos tipos de colágeno se clasifican de acuerdo con el tamaño, la función y la distribución según la composición de sus aminoácidos y hoy en día se han convertido en ingredientes demandados para mejorar características tecnológico-funcionales en alimentos saludables, debido a su aporte proteico y a sus adecuadas capacidades de absorción de agua, formación de gel y de formación y estabilización de emulsiones (Schmidt et al., 2016; Gómez-Guillén et al., 2011). En la industria de alimentos y bebidas se utiliza para mejorar la elasticidad, consistencia y estabilidad de los productos (Hashim et al., 2015). Además, puede mejorar el valor nutricional de los productos. Las proteínas de colágeno se han utilizado en suplementos dietéticos, aditivos alimentarios, películas y recubrimientos comestibles y como sustituto de grasa en salchichas (Suurs & Barbut, 2020; Kumar, 2019), chocolate amargo y carne para hamburguesas (León-López et al., 2019; Xiong, 2018; Carvalho et al., 2017; Petridis et al., 2014), mejorando las propiedades tecnológicas y reológicas.

### **Gelatina**

La gelatina es un polímero natural de apariencia incolora, translúcido, inodoro e insoluble en agua fría. Es una proteína de fácil digestión y proporciona a los consumidores ocho aminoácidos esenciales. Tiene un alto contenido de proteína (85-95%) (Alipal et al., 2021; Nasrollahzadeh et al., 2021), y desde 1993, posee estatus GRAS. La gelatina se obtenido mediante la hidrólisis parcial del colágeno (Keenan, 2012) y su fabricación comienza con un pretratamiento para retirar materiales no colágenos (Benjakul & Kittiphattanabawon, 2018) y así aumentar la eficiencia de extracción y la pureza de producto. Posteriormente, el colágeno se somete a una hidrólisis controlada para obtener gelatina soluble; esto se puede realizar mediante un proceso ácido o alcalino. En una hidrólisis ácida (pH 1.5 a 3)

la materia prima se sumerge en un ácido diluido máximo al 5% de ácido clorhídrico, sulfúrico o fosfórico a una temperatura de 15 °C durante 10 a 48 h y en un proceso alcalino (pH 12) el producto se sumerge en una solución de hidróxido de calcio o sodio, a una temperatura menor de 24 °C, por 2 a 3 meses dependiendo del grosor y el tipo de materia prima. La elección del proceso de hidrólisis dependerá del grado de reticulación que presente la materia prima y del tipo de gelatina que se desea obtener. El proceso ácido se usa principalmente para materias primas menos reticuladas, como son los huesos de ganado joven y piel de cerdo, y se produce gelatina tipo A, mientras que el proceso alcalino da lugar a gelatinas de tipo B (Dille et al., 2021; Huang et al., 2019; Ahmad et al., 2017; Miladinovet al., 2002), siendo la primera apropiada para aplicaciones alimentarias. Posterior a la hidrólisis, el producto obtenido se lava con agua y se neutraliza hasta alcanzar el pH de extracción. La extracción de la gelatina se realiza en tres a cuatro extracciones con agua a temperaturas crecientes que van de 55 a 100°C (Haug & Draget, 2011), cada extracción dura entre 4 y 8 h (Keenan, 2012) con la finalidad de destruir los enlaces de hidrógeno que estabilizan la triple hélice del colágeno, ya que durante la transición del colágeno a gelatina, los enlaces no covalentes y algunos enlaces covalentes inter e intramoleculares y peptídicos se rompen (Benjakul et al., 2012) razón por la cual en cada una de las extracciones se produce gelatinas con una fuerza de gel decreciente y un aumento de viscosidad y color. El color de la gelatina se origina por la reacción de Maillard que ocurre entre los grupos  $\alpha$ -amino de los aminoácidos en la gelatina y las trazas de carbohidratos en la materia prima (Dille et al., 2021). Después de la extracción, las gelatinas se filtran para eliminar la grasa y las fibras de colágeno no extraídas y se purifican mediante desionización ajustando el pH a un rango de 5 a 5.8 (Harris et al., 2003). A continuación, la gelatina se concentra (20-40%) por evaporación continua a vacío (Keena, 2012), se esteriliza de forma directa con vapor e indirectamente a través de intercambiadores de calor de placas y se seca utilizando aire filtrado (30-60°C). Finalmente, la gelatina se muele a un tamaño de partícula que va de 0.1 a 10 mm de diámetro (Dille et al., 2021; Nasrollahzadeh et al., 2021; Benjakul & Kittiphattanabawon, 2018, Keena,

2012). Las propiedades física y químicas de la gelatina dependen en gran medida de la fuente de colágeno (Gómez-Guillén et al., 2011), del proceso de fabricación, así como de las condiciones de extracción y concentración, el pH y especialmente de la temperatura ya que este último tiene un efecto significativo en el peso molecular, la hidrofobicidad, los grupos polares, la composición de aminoácidos y en la cadena  $\alpha/\beta$  de la gelatina (Siburian et al., 2020; Sha et al., 2019; Keena, 2012). En los últimos años, el uso de la gelatina ha incrementado debido a las diversas propiedades gelificantes, espumantes, estabilizantes, emulsionantes y aglutinantes que ofrece en la elaboración de productos alimenticios, farmacéuticos, cosméticos, médicos y fotográficos (Nasrollahzadeh et al., 2021). Cabe destacar que la capacidad gelificante termorreversible de la gelatina se debe a presencia de los aminoácidos prolina e hidroxiprolina y hace sea única en términos de funcionalidad, ya que, gelifica cuando se enfría y se licua cuando se calienta, este proceso es rápido y puede repetirse sin originar cambios significativos en sus características (Rousselot, 2021). En la producción de alimentos, la gelatina se incorpora como ingrediente tecnológico-funcional en productos lácteos, cárnicos, de confitería, salsas, aderezos, bebidas, entre otros, contribuyendo de manera significativa en su textura, capacidad de retención de agua, estabilidad de emulsión y elasticidad (Nitsuwat et al., 2021; Yang et al., 2020; Huang et al., 2019; Yashini et al., 2019; Feng et al., 2017; Karim & Bhat, 2008). La gelatina es considerada un ingrediente ideal para desarrollar alimentos reducidos o bajos en grasa, pues funciona como una proteína funcional mimética que amortigua los efectos que pueden provocar la falta de este componente sobre la textura, sabor y vida útil y es capaz de fijar su propio peso en agua entre 5 y 10 veces (Rousselot, 2021). En la tabla 3 se describe la función de la gelatina como remplazante de grasa en diversos productos bajos en grasa.

### **Proteína de huevo (Proteína de clara de huevo)**

El huevo es considerado uno de los alimentos más importantes y nutritivos del ser humano y constituye una fuente rica de proteínas, fosfolípidos, minerales y vitaminas A, B, D, E y K (Kiosseoglou & Paraskevopoulou, 2014). Un huevo entero

se compone de 12% lípidos, 12% proteínas y 76% de agua, carbohidratos y minerales. Las proteínas se distribuyen de la siguiente forma: 44% en la yema, 50% en la clara y el resto en la cáscara y membrana de esta (Xiao et al., 2021; Mine, 2007). En la Tabla 5 se muestra la composición química de la yema y clara de huevo (Chang et al., 2018). El huevo se caracteriza por ser un alimento multifuncional, no solo por el valor nutricional que pueda aportar, sino que también por contribuir a mejorar el color y sabor, así como optimizar las propiedades emulsionantes, espumantes, gelificante y coagulación de diversos productos tales como fideos, mayonesa, pasteles, productos cárnicos formulados y confitería (Nasrollahzadeh et al., 2021; Lili et al., 2015; Mine, 2002). Estas propiedades tecnológico-funcionales son proporcionadas tanto por la yema como por la clara. Sin embargo, cada una de las fracciones está compuesta por diferentes tipos de proteínas con distintas estructuras y funcionalidad; por ejemplo, la clara se emplea comúnmente para mejorar la capacidad espumante mientras que la yema contribuye en la dispersión de agua-aceite y, en algunos casos, un componente funciona mejor en presencia del otro. Hoy en día la proteína de clara de huevo (EWP) ha tomado mayor relevancia debido a sus propiedades funcionales como mimético de grasa en diversos sistemas alimentarios. La clara de huevo representa 63% del huevo entero, donde 11% son proteínas especialmente, ovoalbúmina, ovotransferrina y lisozimas, entre otras (Campbell et al., 2003), contribuyendo a la formación de espuma, la emulsificación, el termofijado y la acción de aglutinante de productos bajos y/o reducidos de grasa (Yashini et al., 2019; Garcés-Rimón, et al., 2016; Mine, 2002). La producción de EWP comienza con el lavado y desinfección de los huevos enteros, con equipos especializados se rompe y se separa la cáscara, la yema y la clara para que cada subproducto obtenido se someta a diferentes tratamientos; en el caso de la EWP o albúmina de huevo se pasteuriza a través de intercambiadores de calor (57-59°C, 3.5 min); la temperatura exacta a utilizar dependerá del valor del pH, ya que mientras más alta sea el pH la temperatura a emplear será más baja. Posteriormente, la EWP se enfría a 4.5 °C y se seca por aspersion (Belyavin, 2016; Wu, 2014; Lechevalier et al., 2013; Strixner & Kulozik, 2011); antes del secado se

retira la glucosa presente en la albúmina mediante fermentación bacteriana o por oxidación de la glucosa a ácido glucónico, para evitar la reacción de los aminoácidos libres y el azúcar reductor (Strixner & Kulozik, 2011; Bergquist, 2007). El producto que se obtiene es un polvo de color blanco con 78-83% de proteína, 8% máximo de humedad y pH de 5-8.8. Una de las principales desventajas de la EWP es que presenta baja capacidad de dispersión en agua y los polvos tienden a aglutinarse y formar aglomeraciones difíciles de romper; además, en emulsiones a pH básico la mezcla es inestable, por lo que se recomienda el uso en productos en condiciones ácidas. Estudios realizados han demostrado que la adición de algún polisacárido puede mejorar la estabilidad de las gotas de emulsión (Sun et al., 2022; Sadahira et al., 2016), absorbiéndose sobre las superficies de las gotas de aceite para formar una capa protectora y mantener la estabilidad de la emulsión a través del impedimento estérico y, de esta forma, aumentar su uso en diversos sistemas alimentarios (Murray, 2020; Yashini et al., 2019; Chang et al., 2017); alguno de los ingredientes propuestos incluyen goma xantana, pectina, clara de huevo y proteína de suero (Yashini et al., 2019).

### **Proteínas de origen vegetal**

Desde el punto de vista nutrimental las proteínas de origen vegetal se consideran deficientes en comparación con las proteínas de origen animal, ya que con frecuencia no contienen todos los aminoácidos esenciales en las proporciones requeridas (Kumar et al., 2021; Yashini et al., 2019; Marcus, 2013). Sin embargo, la demanda de este tipo de proteína ha tomado mayor importancia, debido a que ciertos grupos de la población y organizaciones han mostrado preocupación por el bienestar animal y el aumento del efecto invernadero como consecuencia de la producción de proteína cárnica, además de considerar la proteína vegetal como una alternativa emergente, económica y viable en el remplazo de la proteína animal (Munoz et al., 2021; Tan et al., 2021; Kim et al., 2020; Vatansever et al., 2020; Wen et al., 2020). Generalmente, las proteínas vegetales se clasifican en cuatro grupos, conocida comúnmente como *fracciones de Osborne* y está dada en función a la solubilidad que presentan en diferentes disolventes, y son; albúminas, globulinas,

prolaminas y glutelinas (Avelar et al., 2021; Lafarga, 2018; Zhou et al., 2013). Las albuminas son soluble en agua y se coagulan por calentamiento; las globulinas son insolubles en agua, pero solubles en soluciones salinas y se puede obtener fácilmente en estado cristalino; las prolaminas son únicamente solubles en soluciones alcohólicas concentradas y son ricas en prolina, arginina y asparagina, mientras que las glutelinas son solubles en soluciones ácidas o alcalinas diluidas para promover su solubilización y extracción (Avelar et al., 2021; Loveday, 2019; Lafarga, 2018; Nadathur et al., 2017; Nesterenko et al., 2013; Shewry & Casey, 1999). Sin embargo, a pesar de ser la clasificación más importante para la fabricación comercial de proteínas alimentarias, en ocasiones ésta resulta inadecuada a nivel tecnológico, ya que a lo largo de los años se ha observado que éstas constituyen mezclas complejas, dependientes del origen, estructura, composición, tamaño molecular e inclusive de la especie y subespecie de la planta los cuales pueden dar lugar a diferencias en su funcionalidad (Avelar et al., 2021). Las proteínas vegetales se obtienen de diferentes fuentes, tales como cereales (arroz, trigo, avena, mijo, sorgo, maíz y cebada), legumbres (soja, chicharo, frijol, garbanzo, habas), semillas (chia, linaza sésamo, calabaza y girasol), verduras y frutas (Sá et al., 2020; Yashini et al., 2019; Mohammad & Teow, 2016). Además de su valor nutricional, las proteínas vegetales pueden exhibir actividad biológica (antihipertensiva, antioxidante, antiinflamatoria, anticancerígena y antimicrobiana) (Hertzler et al., 2020; Wan et al., 2015) y al igual que las proteínas de origen animal presentan propiedades tecnológico-funcionales únicas, como la capacidad de solubilidad, gelificación, formación de espuma, emulsión, retención de agua y capacidad de unión a grasas, que pueden ser aprovechadas como fuente alternativa en el desarrollo de múltiples alimentos (Avelar et al., 2021; Einhorn-Stoll et al., 2021; Tan et al., 2021; Lafarga, 2018). No obstante, este tipo de proteínas presenta algunos inconvenientes que limitan sus aplicaciones, tales como la presencia de alérgenos y sabores objetables (Wu & Sun, 2012) y la desnaturalización parcial que pueden sufrir debido a los métodos (térmico, enzimático o químico) y condiciones de extracción (pH, temperatura, presión)

seleccionados (Tan et al., 2021; Nadathur et al., 2017). Por ello, se han buscado mejoras desde el punto de vista genético hasta alternativas de aislamiento, extracción, fabricación y desarrollo de productos (Kumar et al., 2021b). En los últimos años, las proteínas vegetales se han utilizado como sustitutos de carbohidratos y grasas en diversos alimentos, debido a la baja cantidad calórica y porque tienen la capacidad de imitar las propiedades tecnológico-funcionales de las grasas en los alimentos bajos en grasa (Kumar et al., 2021a; Tan et al., 2021; Yashini et al., 2019). A continuación, se describen los principales miméticos de grasas a base de proteínas vegetales que mayormente se comercializan incluyendo las fuentes emergentes de proteína vegetal y en la Tabla 6 se resumen las principales funciones de los replazantes de grasa a base de proteína vegetal en diversos grupos de alimentos.

### **Proteína de soya**

La soya es una fuente de proteína de alta calidad; ésta se obtiene de los frijoles de soya y se distingue por tener una composición equilibrada de aminoácidos esenciales (Kumar et al. 2021a). La soya no sólo presenta valores nutricionales altos, sino que además realiza funciones fisiológicas importantes, como reducir el colesterol, inhibir la resorción ósea y estimular la formación de hueso y prevenir cáncer de mama y próstata (Nishinari et al, 2018). Cabe mencionar, que la proteína de soya fue reconocida y aceptada por la FDA en 1999 como un alimento saludable, declarando que la ingesta diaria de 25 g de proteína de soya puede reducir el riesgo de enfermedades coronarias (Nasrollahzadeh et al., 2021; Ciabotti et al., 2016; Alibhai et al., 2006). Estados Unidos, Brasil y Argentina son los principales productores, cultivando aproximadamente el 90% de la soya a nivel mundial (Thrane et al., 2017). La soya contiene 40% de proteína, 20% de grasa, 15% de mono y oligosacáridos y 15% de fibra dietética (Einhorn-Stoll et al., 2021; Yashini et al., 2019; Nishinari et al., 2018). Las proteínas de soya representan un grupo de globulinas que se clasifican convencionalmente en cuatro componentes principales; 2S(albumina), 7S( $\beta$ -conglucina), 11S (Glicina) y 15S (dímero de Glicina) (Sui et al., 2021). La fracción 2S está compuesta por proteínas de bajo peso molecular

(mayoritariamente albuminas) y las restantes son globulinas de alto peso molecular, definidas como proteínas de reserva que se solubilizan a pH mayores a 8 (punto isoeléctrico  $pI$  4.2-4.8). Las globulinas 11S y 7S representan aproximadamente el 65-89% del contenido total de las proteínas de la soya (Tang, 2021; Sui et al., 2021; Kim et al., 2020; Visakh, 2017). La globulina 11S está formada por dos hexámeros unidos por enlaces disulfuros con un peso molecular de 350 kDa y consta de seis unidades ácidas y seis básicas. Esta proteína presenta baja viscosidad y alta estabilidad térmica. La globulina 7S es una glicoproteína con un peso molecular promedio de 180 kDa y un  $pI$  de 4.8 (Tang, 2021). Caso contrario a la globulina 11S, la  $\beta$ -conglucina presenta alta viscosidad y baja estabilidad térmica. (Visakh, 2017). Sin embargo, ambos componentes coexisten como moléculas esféricas con una capa hidrófila y un núcleo hidrófobo (Luo & Hu, 2017) y debido a las diferencias en composición y estructuras, las globulinas 11S y 7S juegan un papel muy importante en las propiedades nutricionales y funcionales de la proteína de soya (Fukushima, 2011). La proteína de soya muestra grandes propiedades emulsionantes, comparado con el resto de las proteínas vegetales, dado que actúa disminuyendo la tensión interfacial agua-aceite y ayuda a estabilizar la emulsión formando una barrera física en la interfaz (Nishinari et al., 2018). También, se caracteriza por tener propiedades tecnológicas, tales como gelificación, dispersabilidad, humectabilidad, aglutinante de sabor, formación de espuma y capacidad de retención de agua y grasa, atributos que son usados en el procesamiento y desarrollo de alimentos (Sui et al., 2021; Ashaolu, 2020; Loveday, 2019; Lafarga, 2018; Thrane et al., 2017). Cabe mencionar que estas propiedades pueden verse alteradas positiva o negativamente; debido múltiples factores incluyendo la proporción de las proteínas mayoritarias, los métodos y condiciones de extracción, el procesamiento en alimentos etc. El tratamiento térmico puede inducir la separación, desnaturalización y agregación de las subunidades 7S y 11S provocando la gelificación de proteínas (Einhorn-Stoll et al., 2021; Nishinari et al 2014); cuando interactúa con otros agentes gelificantes (como los hidrocoloides) puede mejorar sus propiedades gelificantes (Sui et al., 2021;). Para el procesamiento de alimentos existe tres fuentes de

proteína de soya: harina, concentrado (SPC) y aislado (SPI); la diferencia de cada producto se centra en el proceso de obtención, en sus concentraciones de proteína y en las propiedades funcionales que exhiben (Sui et al., 2021; Zhang et al., 2021). En la Tabla 7 se proporciona la composición aproximada de estos productos proteicos (Tian et al., 2018).

La harina de soya se obtiene de la molienda directa de la soya, mientras que los SPC y SPI, se producen a partir de hojuelas o harinas de soya descascarados y desgrasados tras la extracción de aceites y grasas. Para el proceso de obtención de los SPC se desnaturalizan las proteínas y se extraen los carbohidratos solubles empleando ácido diluido a pH 4.5 (el punto isoeléctrico de 7S y 11S), o desnaturalización por calor y lixiviación con agua o una solución de alcohol etílico acuoso (60- 90%) (Visakh, 2017; Thrane et al., 2017). El SPI se obtiene colocando las hojuelas desgrasadas en agua o en una solución alcalina diluida (pH 8-9) a 50-55 °C para eliminar azúcares. Después, el extracto de proteína se separa del residuo insoluble (polisacáridos y proteína residual) mediante cribado, filtrado o centrifugación y se ajusta el pH a 4.5 (ácido clorhídrico o fosfórico) para precipitar las proteínas principales y separar el precipitado del suero mediante centrifugación. Finalmente, el precipitado se ajusta a un pH de pH 6.8 – 7.2 con sales alcalinas de hidróxido de sodio o potasio. El producto final se seca por aspersion. La figura 7 muestra el diagrama general de la obtención de SCP y SCI. Las proteínas finales de los SCP y SCI siempre serán la  $\beta$ -conglucina y glicina (Duque-Estrada et al., 2020; Chua & Liu, 2019; Thrane et al., 2017; Paulsen, 2009). Una manera de mejorar las propiedades funcionales de la proteína es promover la descomposición de la glicina o  $\beta$ -conglucina en los SPI mediante proteólisis selectiva y de esta forma obtener proteína hidrolizada de soya, un producto ampliamente utilizado en la industria alimentaria (Yashini et al., 2019). Los productos de proteína de soya se utilizan como sustitutos de grasa en alimenticios bajos en grasa y también como factor de funcionalidad en productos bajos en azúcar y enriquecidos (Yashini et al., 2019; Sun et al., 2017). Su uso como ingrediente reemplazante es que se puede bajar el contenido de grasa sin alterar el sabor y la calidad, además de disminuir los

precios de las diferentes formulaciones y aumentar la sostenibilidad ambiental con el suministro de proteína de calidad (Nasrollahzadeh et al., 2021; Thrane et al., 2017). En la Tabla 6 se describe las principales funciones de los diferentes ingredientes de soya como remplazante de grasa en distintos productos.

### **Proteína de maíz**

El maíz es considerado el cereal más importante a nivel mundial y se cultiva principalmente en regiones de América, Asia y Europa, con una producción estimada de 1136.3 millones Ton en 2020-2021 (Zhang et al., 2021). El grano de maíz está formado por tres partes: el pericarpio o cáscara (5-7%) que se caracteriza por su contenido elevado de fibra cruda (87%), especialmente celulosa (23%) y hemicelulosa (67%) y cuya función es proteger al grano contra agentes externos e impedir la pérdida de humedad; el endospermo (82-84%) que se compone aproximadamente del 80% de almidón y de 8-15% de proteína (cuerpos proteicos) (Larkins, 2019); y el germen que almacena nutrientes y hormonas, que son movilizadas por enzimas durante las etapas iniciales de germinación. Las proteínas más abundantes del grano de maíz son las zeínas, y aunque contiene casi todos los aminoácidos esenciales, es una proteína deficiente en lisina y triptófano (Nasrollahzadeh et al., 2021). La zeína tiene una estructura globular que se identifica como un modelo de rueda helicoidal, donde existen nueve unidades repetidas homologadas orientadas en forma antiparalela y estabilizadas por enlaces de hidrógeno que se auto ensamblan, forman fibras y se asocian con membranas (Wang et al., 2017; Weissmueller et al., 2016). Las zeínas pertenecen al grupo de las prolaminas y es la principal proteína de almacenamiento de nitrógeno del maíz. Existen cuatro tipos distintas de zeína:  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - y  $\delta$ -zeína; estas se diferencian entre sí, en peso molecular, solubilidad, ubicación dentro de los cuerpos proteicos y secuencia de aminoácidos (Bean et al., 2021; Gagliardi et al., 2020; Muthukumarappan & Swamy, 2018; Wang et al., 2017). La  $\alpha$ -zeína es la proteína más abundante (70-85%) de la zeína total del grano de maíz; es soluble en etanol al 70-95%, tiene grupos complejos de prolaminas (generalmente se encuentran como dímeros con puentes disulfuro) de 19-22 kDa (Song et al., 2020; Momany et

al., 2006); por su parte, la  $\gamma$ -zeína (10-20%) puede ser soluble en etanol mediante la adición de un agente reductor y su peso molecular es de 16-50 kDa; la fracción  $\beta$ -zeína (10-15%, 14 kDa) es soluble en etanol al 30-85% e insoluble en etanol al 95%, mientras que la solubilidad de  $\delta$ -zeína (1-5%) es similar a la de  $\alpha$ -zeína, y su peso molecular es de 10-18 kDa (Tapia-Hernández et al., 2019; Kasaai, 2018; Larkins et al., 2017; Anderson & Lamsal, 2011). Cabe mencionar que a las zeínas extraídas sin agente reductor se les conoce como nativa (Lawton, 2002). Al ser la fracción más abundante, la  $\alpha$ -zeína es el componente principal de la zeína comercial, pero ésta también puede contener fracciones  $\beta$  y  $\gamma$  dependiendo de la fuente de materia prima y los métodos de extracción y purificación empleados (Gagliardi et al., 2020). La zeína es una proteína GRAS de bajo costo y con un proceso simple de purificación a gran escala (Weissmueller et al., 2016). La zeína se extrae generalmente de maíz o harina de gluten de maíz utilizando concentraciones de disolventes adecuados; la proteína obtenida es de color blanco, inodora e insípida (Lawton, 2002; Shukla y Cheryan, 2001). Las zeínas no solo contribuyen en la calidad nutricional del maíz, sino que también influyen en las características físicas del grano y en algunas propiedades tecnológico-funcionales de las harinas de maíz (Larkins, 2019; Luo & Hu, 2017), como las capacidades de formación de espuma, emulsificante y de retención de agua (Espinosa-Pardo et al., 2020). La zeína al ser una proteína hidrófoba se ha utilizado como mimético de grasas en productos como mayonesa, aderezos y en algunos productos de confitería, lácteos y cárnicos, logrando una sustitución del 1 al 40% de grasa (Yashini et al., 2019).

### **Proteína trigo (Gluten)**

El trigo es el tercer cereal más producido a nivel mundial, después del maíz y el arroz; a pesar de ser originario del oeste de Asia, hoy en día los principales productores de trigo son la Unión Europea, Rusia, China, Estados Unidos y Canadá (Flambeau et al., 2017). El trigo se compone principalmente de carbohidratos (78.10%), proteínas (14.7%), grasas (2.10%), minerales (2.10%) y vitaminas (especialmente tiamina y vitamina B) (Ocheme et al., 2018). Las proteínas del trigo

se dividen en proteínas sin gluten (20-25%) y proteínas con gluten (80-85%) (Sharma et al., 2020; Islam et al. 2019), y se distribuyen en el embrión, la capa de aleurona y el endospermo del grano, siendo este último donde se concentra la mayor cantidad de proteínas (74.5%) (Wieser et al., 2020). Las proteínas que no contienen gluten incluyen las albúminas (soluble en agua) y globulinas (soluble en soluciones salinas), generalmente se encuentran en la aleurona y en el embrión, y durante la molienda se elimina la mayor cantidad, por lo que no son determinantes en las propiedades funcionales del grano. Sin embargo, estas suelen desencadenar respuestas alérgicas en ciertas personas, razón por la cual se han desarrollado varios procedimientos para aislarlas y caracterizarlas (Lafiandra et al., 2012). Las proteínas con gluten contienen componentes proteicos que están presentes como monómeros, divididas en gluteninas (40%) y gliadinas (60%), en función de su solubilidad en alcohol (Yashini et al., 2019). Las gluteninas son proteínas poliméricas estabilizadas por enlaces disulfuros, son insolubles en alcohol, pero si los enlaces se reducen se liberan dos grupos principales de polipéptidos solubles en alcohol; glutenina de alto peso molecular (70-90 kDa) y de bajo peso molecular (20-45 kDa) y representan el 40% y 60% de la composición, respectivamente (Sharma et al., 2020). Sin embargo, desde el punto de vista funcional la glutenina también se clasifica según su capacidad para contribuir al crecimiento de polímeros de glutenina, incluyendo a los extensores de cadena que tienen dos residuos de cisteína disponibles para formar enlaces disulfuro intermoleculares con muchas subunidades de glutenina y así aumentar el crecimiento del polímero de forma lineal; los ramificadores de cadena tienen al menos tres residuos de cisteína y, como su nombre lo indica, el crecimiento es de forma ramificada, mientras que los terminadores de cadena tienen sólo un residuo de cisteína desapareado y, por lo tanto, no permiten un mayor crecimiento del polímero de glutenina (Lafiandra et al., 2012). Por otro lado, las gliadinas son mezclas de polipéptidos heterogéneos que actúan como agentes suavizantes de las gluteninas, aumentando la viscosidad del gluten y reduciendo su nivel de elasticidad (Guo et al., 2018); éstas se clasifican en  $\alpha$ - (55%),  $\gamma$ - (30%) y  $\omega$ - (15%) gliadinas y se pueden distinguir en función de su

secuencia de aminoácidos y su movilidad en electroforesis en gel a pH bajos (Sharma et al., 2020; Islam et al. 2019; Assadpour & Jafari, 2019). Las gliadinas y gluteninas, junto con sus enlaces disulfuros intermoleculares, contribuyen a la estructura, tamaño, composición y propiedades del gluten (Ibarra et al., 2016); por ejemplo, las gliadinas hidratadas contribuyen principalmente a la viscosidad y extensibilidad del sistema, mientras que las gluteninas son las responsables de la fuerza y elasticidad (Sharma et al., 2020; Wieser, 2007), por lo que la proporción adecuada de glutenina y gliadinas (conocido como *índice de gluten*) determina la calidad del producto final (Assadpour & Jafari, 2019; Islam et al., 2019; Ortolan & Steel, 2017). Cabe mencionar que la presencia, el número y distribución de los residuos de cisteína es relevante ya que este aminoácido generalmente está presente en un estado oxidado formando los enlaces disulfuros intra e inter proteicos, siendo responsables de la estructura y propiedades del gluten, y de las reacciones que ocurren durante la maduración y el procesamiento de los granos (Wieser, 2020; Lafiandra et al., 2012). El gluten se extrae por métodos mecánicos, enzimáticos y químicos, siendo el mecánico el más empleado. La extracción del gluten comienza con la molienda y el tamizado de los granos, en la que el salvado y el germen se eliminan de la harina. Posteriormente, la harina se mezcla con agua (70 °C) para separar el almidón del gluten y se seca. En el mercado se pueden encontrar tres tipos de proteína de trigo: gluten de trigo vital (alta viscoelasticidad), gluten de trigo desvitalizado (baja viscoelasticidad) y aislado de proteína de trigo solubilizado (SWPI). Los SWPI son proteínas de trigo modificadas para mejorar sus propiedades funcionales y poseen un mayor contenido de proteico (90%) (Flambeau et al., 2017; Ortolan & Steel, 2017). En ciertos alimentos, el gluten se emplea como mimético de grasa, debido su capacidad emulsionante, espumante, gelificante, de retención de grasa y agua, así como a sus propiedades viscoelásticas, de resistencia a la tracción y de barrera que ejerce en distintos productos como mayonesa, embutidos, entre otros (Tabla 6) (Assadpour & Jafari, 2019); además es un ingrediente de bajo costo en comparación con las proteínas de origen animal (Wu et al., 2018). Sin embargo, la presencia de gluten en ciertos alimentos se ha

relacionado con la incidencia de la enfermedad celíaca, la cual es una respuesta inmune anormal mediada por células que conduce a una reacción inflamatoria en el intestino delgado y al aplanamiento de la mucosa causado por la ingestión de proteínas prolaminas del endospermo almidonado del trigo, cebada y centeno, en las que las  $\alpha$ -gliadinas parecen ser las más activas, por ser un péptido de 33 residuos que las enzimas del tracto gastrointestinal o las enzimas del borde en cepillo de la mucosa no digieren por completo (Ocheme et al., 2018; Grant et al., 2012); por ello, se destaca en la lista de ingredientes para que el consumidor lo pueda ver fácilmente.

### **Proteínas emergentes**

Las siguientes fuentes de proteínas han tomado relevancia como una alternativa nueva a las ya convencionales, debido a su contenido proteico con propiedades funcionales interesantes. Sin embargo, no todas se comercializan a gran escala; algunas se encuentran en investigación, pero se ha reportado que tienen buenos resultados como miméticos de grasa en distintos productos. En la Tabla 6 se resumen las principales funciones de los remplazantes de grasa a base de proteínas emergentes en diversos grupos de alimentos.

### **Proteína de chícharo**

La proteína de chícharo es una proteína vegetal relativamente nueva y en los últimos años se ha vuelto popular en la industria alimentaria debido a su disponibilidad, bajo costo, valor nutrimental, alta digestibilidad, baja alergenicidad y beneficios en la salud (Lu et al., 2020; Lam et al., 2018). A pesar de ello, su uso aún es limitado. Los chícharos son el segundo cultivo de legumbres más importante a nivel global, representando el 34.2% de la producción en 2019; Canadá, Rusia, Estados Unidos e India son los principales productores (Boukid et al., 2021; Burger & Zhang, 2019). Los chícharos contienen 23-31% de proteína, 60-65% de carbohidratos, 1-2% de grasa y vitaminas y minerales (Bogahawaththa et al., 2019). La proteína de chícharo se considera de alta calidad por contener la mayoría de los aminoácidos esenciales, excepto metionina; sin embargo, cumple con lo

recomendado por la FAO/OMS. Las proteínas se componen principalmente de globulinas y albuminas 2S, las cuales representan 50-60% y 15-25 % del contenido total, respectivamente (Alves & Tavares, 2019; Chihi et al., 2016), aunque su contenido puede variar según la especie y los métodos de producción. Las albuminas son proteínas que tienen un peso molecular de 5-80 kDa; incluyen proteínas metabólicas y enzimáticas, inhibidores de proteasa, amilasa y lectinas (Bogahawaththa et al., 2019; Burger & Zhang, 2019). Las globulinas están constituidas por legumina (11S), de estructura hexámera de 360-400 kDa, con seis subunidades cada una, formada por polipéptidos ácidos y básicos unidos por enlaces disulfuro; vicilina (7S), una proteína trimétrica flexible, de 150 kDa, bajas en aminoácidos azufrados; y convicilina (7S), proteína de almacenamiento de 290 kDa, que consta de subunidades asociadas a trímeros o tetrámeros (Amagliani & Schmitt, 2017; Chini et al., 2016); todas poseen el mismo punto isoeléctrico (4.5) y temperatura de desnaturalización (82.7-85.5 °C). Comercialmente, los ingredientes de proteína de chícharo están disponibles como aislado de proteína de chícharo (PPI) y concentrado de proteína de chícharo (PPC) (Boukid et al., 2021). Las proteínas se pueden obtener por extracción húmeda (extracción alcalina-precipitación isoeléctrica), fraccionamiento en seco (reducción de tamaño y clasificación por aire) o fraccionamiento suave (método híbrido) (Boukid et al., 2021; Rampel et al., 2019; Pelgrom et al., 2015), siendo el primero el más usado comercialmente. Los métodos mencionados se muestran esquemáticamente en la Figura 8. La extracción húmeda se emplea para obtener PPI y parte de la harina desgrasada de chícharo que se mezcla en una solución con pH alcalino (hidróxido de potasio, sodio o calcio) a 50-60°C por 30-180 min. Posteriormente, la suspensión pasa por un hidrociclón para separar las proteínas del almidón y al sobrenadante se ajusta al pH isoeléctrico con ácido clorhídrico o sulfúrico. Finalmente, la proteína precipitada se lava, neutraliza y se seca mediante secado por tambor o aspersión (Moreno et al., 2020; Lam et al., 2018; McCarthy et al., 2016). El fraccionamiento suave emplea la separación por centrifugación o por membranas (ultrafiltración y diafiltración) para aumentar la concentración de proteínas (Boukid et al., 2021). El

PPC se puede extraer mediante el método de extracción en húmedo y el método de clasificación por aire (Yashini et al., 2019). Sin embargo, existe la necesidad de mejorar las condiciones de procesamiento de extracción comercial de la proteína de chícharo para proteger la proteína contra la desnaturalización y la aglomeración y promover su uso en la industria alimentaria (Burger & Zhang, 2019). El PPC y PPI son valuados por su contribución a las propiedades tecno-funcionales en diversos alimentos incluyendo solubilidad, capacidad de retención de agua y aceite, emulsificación, formación de espuma, solidificación y gelificación (Ashaolu, 2020; Lu et al., 2020; Zhao et al., 2020; Lam et al., 2018). Las propiedades estructurales, funcionales y aromáticas de las proteínas se ven afectadas por las condiciones de extracción, como la; temperatura, pH, tiempo, concentración, fuerza iónica y tipo de disolvente; por ejemplo, los PPI comerciales tienen una solubilidad baja a pH entre 2 a 9, y aumenta a medida que la temperatura se eleva de 0 a 50°C hasta una temperatura en la que los enlaces no covalentes se desestabilizan y se pierden las estructuras secundarias y terciarias; en cuanto a la capacidad emulsificante, esta disminuye a valores de pH cercanos a su punto isoeléctrico y aumenta a pH>7 y a mayor contenido de globulinas (Gao et al., 2020; Zhao et al., 2020; Burger & Zhang, 2019; Lam et al., 2018; McCarthy et al., 2016), razón por la cual es importante la selección del proceso de extracción adecuado para maximizar el rendimiento y las propiedades funcionales que influirán en su uso como ingrediente en la industria alimentaria. Las proteínas de chícharo se han empleado como ingrediente funcional para mejorar las características sensoriales (principalmente textura) de varios productos libres de gluten con características similares al gluten de trigo, además de su uso como suplemento alimenticio, emulsionante de alimentos, ingrediente de bebidas fortificadas, en mezclas de proteínas, aplicaciones farmacéuticas y como sustitutos de grasa en productos cárnicos, aderezos para ensaladas y mayonesa (Lu et al., 2020; Yashini et al., 2019; Lam et al., 2018; Shahiri & Mazaheri, 2014).

### **Proteína de altramuz (Lupin Protein)**

El altramuz (también conocido como lupín), es una legumbre de color amarillo, originario de la región mediterráneo y de América Latina (Al-Ali et al., 2021;

Lo et al., 2021). Sin embargo, en la actualidad se cultiva principalmente en Australia, donde se produce 80-85% del total mundial. El altramuz se compone de proteína (39.6-42.2%), lípidos (7.6%), cenizas (3.6%) y fibra (37.8-42%) (Völp et al., 2021; Villarino et al., 2016), que varía según la especie, variedad, temporada de cultivo e incluso el lugar, siendo la *L. mutabilis* la más alta en proteína (Johnson et al., 2017). La proteína de altramuz presenta altos niveles de lisina, pero baja en aminoácidos azufrados (metionina y cisteína) (Al-Ali et al., 2021). La digestibilidad del altramuz es alta (98%), similar a la de soya (97.88%) y superior a la del chícharo (54,4%), debido a su bajo contenido de lectinas (Johnson et al., 2017). Las fracciones proteicas presentes en los granos de altramuz son las globulinas (87%) y las albúminas (13%). De acuerdo con la movilidad electroforética, las globulinas se clasifican en  $\alpha$ -conglutina (11S),  $\beta$ -conglutina (7S),  $\gamma$  conglutina (7S) y  $\delta$ -conglutina (2S) (Shrestha et al., 2021; Schlegel et al., 2019). La  $\alpha$ -conglutina (35-37%) presenta una estructura hexamérica, formada por múltiples subunidades de 50-80 kDa y cada unidad monomérica se encuentra unida por un enlace disulfuro. La  $\beta$ -conglutina (44-45%) tiene una estructura cuaternaria trimérica que no posee enlaces disulfuros para mantener unidas sus unidades monoméricas. La  $\gamma$ -conglutina (4-5%) está compuesta por dos subunidades de 17 y 30 kDa y es rica en metionina. Por último, la  $\delta$ -conglutina (10-12%) es una proteína compuesta por dos subunidades de 4 y 9 kDa unidas por enlace disulfuro (Al-Ali et al., 2021; Shrestha et al., 2021; Foley et al., 2015). El contenido de proteína y la variación de aminoácidos entre fracción pueden influir en las propiedades funcionales; por ejemplo, la  $\gamma$ -conglutina, que contiene mayor cantidad de aminoácidos azufrados, exhibe mejores propiedades de formación de espuma, mientras que en las fracciones  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\delta$ -conglutina ( $\alpha$ ,  $\beta$ -conglutinas ricas en ácido glutámico) esta es deficiente, aunque exhibe excelentes propiedades emulsionantes (Al-Ali et al., 2021). En los últimos años, la proteína de altramuz se ha considerado como una nueva fuente de proteína debido a sus beneficios nutricionales y funcionales y a su factibilidad económica de producción (Lo et al., 2021). Al igual que otras proteínas vegetales, se emplean métodos secos y húmedos para su extracción; dentro de los húmedos se encuentran; la extracción

alcalina (extracción por precipitación isoeléctrica), micelización (extracción inducida por sal seguida de precipitación diluida) y extracción ácida (Shrestha et al., 2021; Klupšaitė, & Juodeikienė, 2015), siendo la primera la más común por tener un mayor rendimiento (69-82%). Los productos que se pueden obtener incluyen a harinas (65% de proteína), aislados (65-95%) y concentrados de proteína (> 90%) (Völp et al., 2021; Sussmann et al., 2013). Las harinas se obtienen mediante el método de fraccionamiento seco, que implica la molienda y su clasificación selectiva por aire. La micelización se emplea para obtener aislado de proteína micelar de altramuz (MLP) donde las proteínas extraídas se encuentran en forma de micelas y presentan características similares a las de las grasas (textura suave y cremosa) (Muranyi et al., 2013). La extracción alcalina consiste en suspender los granos de altramuz en una solución acuosa y ajustar a pH 8-12 (superior al pI) para obtener la máxima solubilidad de las proteínas. Posteriormente, se centrifuga y se elimina el sedimento que contiene compuestos no proteicos y al resto se le ajusta nuevamente el pH a su punto isoeléctrico (pI 4.5, 8-18 h) para facilitar la precipitación de las proteínas. Finalmente, los precipitados se centrifugan, lavan y secan por aspersion (Lo et al., 2021; Shrestha et al., 2021; Johnson et al., 2017). En algunas compañías se emplean métodos de separación por membranas (ultrafiltración y diafiltración) para favorecer la extracción de globulinas y albúminas. Sin embargo, la elección del método depende del uso final, rendimiento deseado, propiedades funcionales y de los costos que el fabricante considere conveniente. Entre las propiedades tecnológico-funcionales de las proteínas de altramuz, las más importantes son la capacidad de retención al agua, espumante, gelificante (geles termoendurecidos y endurecidos por frío) y emulsificantes (Al-Ali et al., 2021; Lo et al., 2021; Muranyi et al., 2013). Por lo tanto, se usan para mejorar la textura de diversos alimentos y como mimético de grasa en aderezos, mayonesa y embutidos (Völp et al., 2021; Yashini et al., 2019; Johnson et al., 2017). En el caso de la mayonesa, el remplazo de grasa con proteína puede ser del 4 al 8%, sin modificar las características sensoriales del producto (Mirzanajafi-Zanjani et al., 2019; Alu'datt et al., 2017)

## **Miméticos de grasa a base de carbohidratos**

Los carbohidratos están disponibles en los alimentos en diferentes formas y tamaños; son importantes, no solo como fuente de energía, sino que también como ingrediente funcional, seguro, no tóxico y económico (BeMiller, 2019). Los carbohidratos tienen la capacidad de formar soluciones acuosas y hacer sistemas dispersos o coloidales en agua; actuar como agentes emulsionantes, gelificantes y estabilizantes para mejorar la viscosidad de los alimentos bajos en grasa; formar recubrimientos que puedan estabilizar emulsiones y espumas alimentarias (Razavi & Behrouzian, 2018; Bortnowska et al., 2014); además pueden interactuar con otros carbohidratos para mejorar sus propiedades funcionales (Razavi & Behrouzian, 2018). Existen varios carbohidratos que se usan como miméticos para reemplazar parcial o totalmente la grasa en los alimentos. Los miméticos a base de carbohidratos tienen un sabor suave y suelen estabilizar el agua presente incorporándola en una estructura tipo gel (Akbari et al., 2019; Erinc et al., 2018; Peng & Yao, 2017; Chavan et al., 2016), dando como resultado un aumento en la viscosidad, capacidad de untar y sensación cremosa en la boca similar a las grasas (Fellows, 2017; O'Connor & O'Brien, 2011; Swanson, 2003). Sin embargo, no son adecuado para alimentos que serán sometidos a un proceso de fritura y en alimentos con alto contenido en agua ya que aumenta potencialmente el crecimiento microbiano, reduciendo la vida útil del producto. (O'Connor & O'Brien, 2011). Al igual que algunos miméticos de grasa a base de proteínas vegetales, los reemplazantes a base de carbohidratos se forman a partir de oligosacáridos o polisacáridos GRAS extraídos químicamente de algunos cereales, granos y plantas (papa, trigo, tapioca, etc), clasificados en carbohidratos complejos digeribles (proporcionan 4 kcal/g) y no digeribles (0 kcal/g) (Sun & Fang, 2021), estos ingredientes incluyen gomas (pectinas, carragenina, xantana, guar), almidones (nativos y modificados) y sus derivados (maltodextrinas y dextrinas), celulosas (celulosa microcristalina, celulosa en polvo, metilcelulosa, hidroxipropilmetilcelulosa) y fibras con actividad prebiótica (inulina y  $\beta$ -glucano) (O'Sullivan, 2016; O'Connor & O'Brien, 2016). La elección de

polímero influirá en las propiedades finales de los alimentos (sabor, viscosidad, textura, comportamiento reológico, entre otros) (Aziz et al., 2018), por ejemplo, los miméticos de goma tienden a no influir en el sabor, mientras que los miméticos a base de almidón y celulosa tienden a reducir la intensidad del sabor (O'Connor & O'Brien, 2016). A continuación, se describen brevemente estos hidrocoloides como remplazantes de grasa y en la Tabla 8 se resumen las principales funciones de los remplazantes de grasa a base de polisacáridos en diversos grupos de alimentos.

### **Gomas**

Las gomas son hidrocoloides de carbohidratos de alto peso molecular que se disuelven y dispersan en agua (Chavan et al., 2016). Se pueden extraer de plantas u obtener por biosíntesis microbiana o por modificación química de polisacáridos naturales (Nasrollahzadeh et al., 2021). En la Tabla 9 se resume la fuente y los métodos más comunes empleados para su extracción. Las gomas se utilizan como estabilizantes y espesantes y mejoradores de la viscosidad debido a su alta capacidad de retención de agua y a que proporcionan textura, brillo y sensación en boca similar a las grasas. Las gomas no son digeribles y por lo tanto, no aporta calorías; pueden formar entrelazamientos y enlaces cruzados con otros componentes de los alimentos como proteínas, almidones y gotas de emulsión a través de enlaces de hidrógeno e interacciones hidrófobas o electrostáticas (Peng & Yao, 2017). La eficiencia de las gomas como mimético de grasa está determinada principalmente por su composición y estructura química de cada goma, así como de los efectos de la temperatura, pH, fuerzas de cizallamiento y compatibilidad con otros ingredientes dentro de la matriz alimenticia (Sun & Fang, 2021). Como se había mencionado anteriormente, estos polisacáridos se pueden utilizar como remplazantes de grasa solas o en combinación con otro carbohidrato e incluso con alguna otra categoría de sustitutos de grasa (O'Connor & O'Brien, 2016). En la tabla 8 se describe la función que ejercen como remplazante de grasa en distintos alimentos.

## **Almidones (nativos y modificados) y sus derivados (maltodextrinas y dextrinas)**

### **Almidón**

El almidón es el principal polisacárido presente en cereales, tubérculos y algunos vegetales, como maíz, trigo, arroz, papa y yuca, siendo el almidón de maíz el más comercializado a nivel mundial (80%) (BeMiller, 2019; Avérous & Halley, 2014). El almidón está disponible en forma de gránulos de diferentes formas (ovalada, esférica, poligonal o de disco) y tamaños (1-10  $\mu\text{m}$ ); está compuesto por fracciones de amilosa y amilopectina (Rahman & Hasan, 2019) que se encuentran en diferentes proporciones dependiendo de la fuente de almidón y que contribuyen significativamente a su estructura, características y propiedades funcionales. La amilosa (20-30%) es un polímero lineal formado por aproximadamente 840-22,000 unidades de  $\alpha$ -D-glucopiranosilo unidos por enlaces  $\alpha$ -(1,4)-D-glucopiranosido. La amilopectina (70-80%) tiene una estructura amorfa ramificada y sus moléculas son grandes discos aplanados que constan de cadenas de  $\alpha$ -1,4-D-glucopiranosido unidas por puntos frecuentes de  $\alpha$ -1,6-glucopiranosido (Haq et al., 2019; Preiss, 2018). Los almidones que únicamente están constituidas por amilopectina se le conoce como almidones *céreos*. La cantidad y las propiedades fisicoquímicas de la amilosa y amilopectina varían según la fuente, especie e inclusive de la mutación genética que pueda presentar. En la Tabla 10 se presenta los principales almidones comercializados y su composición de amilosa y amilopectina.

La extracción del almidón a nivel comercial se realiza por molienda húmeda, en la que los granos se limpian y se maceran en agua (24-48 h, 50°C), para que el grano absorba 45-50% de agua y pueda facilitar la molienda. Una vez molidos los granos se filtran, purifican, concentran y secan por aspersion o por tambor. La pureza del producto final es de aproximadamente 98-99%. Cuando el almidón se extrae directamente de la fuente y se usa directamente en la producción de ciertos alimentos, se le da el nombre de *almidón nativo*, que corresponde a la forma más pura de este carbohidrato. El almidón nativo se usa en aplicaciones alimentarias e

industriales como espesante, estabilizante, gelificante y como agente de carga y de retención de agua. Los almidones nativos con tamaños granulares similares a las emulsiones de grasas son usados como remplazantes de grasas, porque pueden dispersarse igual a las gotas de emulsión, contribuyendo en la textura y en las propiedades sensoriales del alimento. Sin embargo, el almidón nativo es insoluble en agua fría e inestable a diversos valores de pH y temperatura, haciendo que los gránulos presentes se hidraten, hinchen y rompan fácil y rápidamente, por lo que su funcionalidad es limitada (Chavan et al., 2021; Akbari et al., 2019), razón por la cual se someten a diversos procesos de modificación antes o durante su uso. La modificación del almidón consiste en alterar la estructura molecular del almidón nativo para mejorar una o más propiedades funcionales, por ejemplo, la solubilidad, gelatinización (reducir tiempo y temperatura), textura, viscosidad y/o estabilidad térmica (Nasrollahzadeh et al., 2021; Haq, 2020). La modificación puede realizarse por métodos físicos, químicos o enzimáticos (Obadi & Xu, 2021), considerando que no todos los almidones modificados son adecuados para aplicaciones alimentarias. La modificación física del almidón es simple, barata y se puede utilizar de forma segura en productos alimenticios, porque no requiere del uso de agentes químicos. Los métodos empleados abarcan todos los procesos de pregelatinización (almidones instantáneos) donde el orden granular del almidón se pierde junto con la despolimerización parcial de los componentes del almidón y los procesos hidrotermales donde la integridad molecular de los almidones se conserva (BeMiller, 2018; Ashogbon & Akintayo, 2014). La modificación química se lleva a cabo incorporando grupos funcionales y facilitando los enlaces intra e intermoleculares en ubicaciones aleatorias del gránulo de almidón para dar estabilidad y generar cambios en la gelatinización, retrogradación, consistencia, suavidad y estabilidad a la congelación y la refrigeración. Las modificaciones químicas más utilizadas en la industria alimentaria son la derivatización, eterificación, esterificación, reticulación, hidrólisis, oxidación y sustitución (Haq et al., 2019; Wu & Zhou, 2018; Masina et al., 2017), y la elección del método depende de los cambios que se deseen obtener; por ejemplo, la hidrólisis ácida y oxidación son procedimientos de despolimerización

utilizados para producir almidón diluido con menor viscosidad y temperaturas de empaste y gelatinización, mejor emulsificación y mayor solubilidad. La modificación enzimática es una técnica alternativa para modificar la estructura granular y molecular de los almidones nativos; se realiza utilizando enzimas hidrolizantes, es selectiva, no puede utilizarse en almidones céreos y genera menos subproductos indeseables comparados con los procesos químicos (Obadi & Xu, 2021; Wu & Zhou, 2018). Los almidones modificados como sustitutos de grasas son de baja digestibilidad (Akbari et al., 2019); pueden transportar sabores y nutrientes lipofílicos e interactuar con otros componentes de los alimentos; se usan en muchos productos lácteos, cárnicos, de panificación, aderezos, entre otros, para ofrecer diferentes efectos, incluida la viscosidad, capacidad de corte, sensación en la boca y estabilidad (Tabla 10) (Nasrollahzadeh et al., 2021, Chavan et al., 2016)

### **Maltodextrina**

Las maltodextrinas son polímeros que se obtienen de la hidrólisis parcial del almidón (maíz, papa, trigo, arroz, tapioca, cebada y sorgo) por enzimas y/o ácidos adecuados (Chen et al., 2020); son productos de conversión de almidón que contienen una cantidad relativamente pequeña de dextrosa y maltosa; son  $\alpha$ -D-glucanos (unidos por enlaces  $\alpha$ -1-4) con un bajo grado de polimerización (DP) y equivalentes de dextrosa (DE) <20. La DP y DE representa el número de residuos de azúcar y la equivalencia reductora de un carbohidrato dado (esencialmente  $\alpha$ -glucano) frente a la misma masa de glucosa, respectivamente (Lee et al., 2018; Qi & Tester, 2018). El uso de enzimas en el proceso de hidrolítico es más empleado que el de ácidos, debido a que una pequeña cantidad de enzima puede descomponer grandes cantidades de almidón, y eso resulta conveniente desde el punto de vista económico. La enzima empleada ( $\alpha$ -amilasa, pH 6.5, T 90-100°C) es altamente específica (Serna-Saldivar, 2016) y fácil de controlar por lo que una vez que se ha producido la cantidad deseada de hidrólisis, la reacción se detiene y el producto se filtra para eliminar los productos insolubles y se seca (Triyono et al., 2017). En la Figura 9 se muestra la reacción de hidrólisis enzimática del almidón. El

producto obtenido es blanco, blando, inodoro y con un nivel de dulzor bajo. Las propiedades físicas y funcionales de la maltodextrina están determinadas por el valor DE, perfil de sacáridos, la fuente y el método de procesamiento; por ejemplo, las maltodextrinas de papa (DE 5) son solubles a temperaturas bajas y proporcionan baja viscosidad en forma de solución, pero a alta concentración (> 20% p/p) son inestables y tienden a formar geles plásticos y untables similares a la grasa vegetal; la presencia de amilasa con moléculas con cadenas más largas que el maíz y trigo facilitan la retrogradación, reduciendo así la tendencia a causar turbidez y una textura indeseable en los alimentos; por otra parte, la maltodextrina de tapioca se obtiene calentando almidón de tapioca en presencia de ácido clorhídrico, produciendo un gel con un sabor y sensación en boca suave y una textura similar a la de las grasas hidrogenadas (Chavan et al., 2016). Las maltodextrinas con DE inferior a 10 se utilizan como reemplazantes de grasa en diversos productos (ver tabla 8) debido a su capacidad para formar geles suaves, untables y termorreversibles con propiedades de fusión en la boca (Hosseini-Sajedi et al., 2021). La sustitución de grasa en los alimentos con maltodextrina puede ser de 25-35% (Akbari et al., 2019) con un aporte calórico de 1-4 kcal/g.

### **Polidextrosa**

La polidextrosa es un polímero de glucosa altamente ramificado, con un DP promedio de 12 (FAF et al., 2020; Do Carmo et al., 2016). La molécula contiene todos los enlaces glicosídicos posibles con el carbono anomérico de la glucosa;  $\alpha$  y  $\beta$  1-2, 1-3, 1-4 y 1-6 enlaces glucosídicos, predominando los 1-6  $\alpha$  y  $\beta$  (90%), debido a estructura molecular, solo proporciona 1 kcal/g (Stowell, 2009). La polidextrosa se produce mediante la policondensación en masa fundida de glucosa (89%) y sorbitol (10%) en presencia de ácido cítrico (1%) (Tiefenbacher, 2017). La polidextrosa actúa como un agente de carga bajo en calorías que puede reemplazar total o parcialmente los azúcares y algunas de las grasas en los alimentos, manteniendo la textura y sensación en boca; además muestra efectos plastificantes similares a la grasa al retener la humedad; no es dulce, es termoestable (90-110°C),

tiene un sabor neutro y se puede usar en productos horneados, lácteos, confitería y bebidas funcionales ya que es soluble en agua (80%) a temperatura ambiente (Akbari et al., 2019; Chavan et al., 2016). La povidexrosa no solo se emplea como agente humectante, texturizante, espesante, estabilizante y crioprotector (Peng & Yao, 2017), sino que también tiene beneficios nutricionales adicionales en la dieta ya que proporcionan saciedad y propiedades prebióticas. El remplazo de grasa con povidexrosa es de 1-30%, manteniendo el perfil de sabor y textura similar al de los productos estándar (Tiefenbacher, 2017).

### **Celulosa**

La celulosa es un biopolímero producido por las plantas, compuesto por unidades repetidas de D-glucosa unidas por enlaces glucosídicos ( $\beta$ -1,4) (BeMiller, 2019; Chavan et al., 2016). Además de tener una estructura semicristalina con varios grados de cristalinidad en la naturaleza (subestructuras tanto cristalinas como amorfas) (Guan, 2021), es insoluble en todos los disolventes orgánicos y resistente a la degradación enzimática (Fellows, 2017). La celulosa se emplea como agente antiaglutinante, emulsionante, estabilizante, dispersante, espesante, gelificante y de embalaje (Fellows, 2017), para mejorar y potencializar las propiedades funcionales y sensoriales de los alimentos (Phanthong et al., 2018). La celulosa suele transformarse en sus derivados para mejorar su capacidad de procesamiento, mediante la reacción de uno o más grupos hidroxilo presentes en la unidad de repetición (Rahman & Hasan, 2019). Por ejemplo, la parte amorfa de la celulosa es capaz de degradarse parcialmente mediante el tratamiento con ácido para formar celulosas microcristalinas y nanocristalinas de menor tamaño (0.2-1  $\mu$ m) con grupos hidroxilo en la superficie (Guan, 2021); a este derivado se le conoce como celulosa microcristalina (MCC), la cual es una forma no fibrosa de la celulosa (Chavan et al., 2016); que se utiliza como portador de sabor y agente antiaglutinante en alimentos; a la concentración adecuada, los cristales forman una red tridimensional tixotrópica termoestable que imita las propiedades funcionales de las grasas en sistemas acuosos, aportando cuerpo, sensación en boca y viscosidad a los productos (O'Connor & O'Brien, 2016), por lo que es un buen sustituto no calórico de grasa

(Fellows, 2017). Otros derivados de la celulosa que se emplean como aditivos alimentarios incluyen a metilcelulosa (MC), hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) y carboximetilcelulosa (CMC) (He et al., 2020). La CMC se produce haciendo reaccionar la celulosa con ácido cloroacético (Fellows, 2017); además de ser soluble en agua (Wang et al., 2020), tiene excelentes capacidades de gelificación y de hinchamiento sensibles al pH (Liu et al., 2021; Oprea & Voicu, 2020). La MC es un éster metílico que se obtenido al reaccionar la celulosa alcalina con el cloruro de metilo; puede formar hidrogeles termosensibles y su transición sol-gel reversible es inducida por el aumento de temperatura (Liu et al., 2020). La HPMC se obtiene al hacer reaccionar celulosa como óxido de propileno; tiene una estructura lineal formada por moléculas de glucosa estabilizada por enlaces de hidrogeno y es soluble en agua fría (Ghadermazi et al., 2020). Las MC y HPMC son los derivados de celulosa más utilizados en la industria alimentaria; ambas tienen propiedades tensioactivas que pueden usarse para estabilizar emulsiones y espumas (Espert et al., 2017); además pueden usarse como miméticos de grasas en productos horneados, helados, salsas y aderezos para ensaladas (Fellows, 2017 O'Connor & O'Brien, 2016).

### **Fibras con actividad prebiótica (inulina y $\beta$ -glucano)**

#### **Inulina**

La inulina es un biopolímero compuesto de oligo y polisacáridos que tienen monómeros de fructosa (35-60) unidos por enlaces glicosídicos con configuración  $\beta$  en el C2 ( $\beta$ -(2-1)-D-frutosilfructosa) (Akbari et al., 2019; Chavan et al., 2016). Esta configuración  $\beta$  hace que sea resistente a la hidrólisis por enzimas digestivas (Shoaib, et al. 2016). La principal fuente de inulina son los tubérculos de achicoria (68%), pero también las alcachofas de Jerusalén y dalias se consideran excelentes fuentes a nivel industrial (Ahmed & Rashid, 2019). Para la obtención de inulina se emplea el método de extracción por difusión, utilizando agua caliente (70-80°C, 1-2h); el jarabe crudo recuperado se purifica para eliminar las impurezas (80-90°C) y finalmente se filtra y se seca por aspersion (Ahmed & Rashid, 2019; Zhu et al., 2016,

Shoaib, et al. 2016). Algunas pruebas demuestran que el uso de métodos no convencionales como la extracción asistida por ultrasonido y campos eléctricos pulsados pueden mejorar el tiempo, rendimiento y pureza de la extracción, así como el uso de microfiltración y ultrafiltración para reducir algunas etapas en la purificación (Illipangama et al., 2021). La inulina se emplea en la industria alimentaria como ingrediente de fibra para mejorar la textura y el sabor; como sustituto de azúcar y como remplazante de grasa en alimentos bajos en grasa debido a que presenta propiedades funcionales análogas a las grasas y por su capacidad de imitar aspectos sensoriales similares a las grasas animal y aceites de semillas (O'Sullivan, 2017; Zhu et al., 2016). En la tabla 8 se resume las principales aplicaciones de la inulina como mimético de grasa.

### **β-glucano**

El β-glucano (también conocido como glucano de enlace mixto) es un polisacárido de cadena larga que consta de monómeros de D-glucosa enlazados mediante enlaces β-glucosídicos (Sun et al., 2021). Se encuentra presente de la pared celular de algunos cereales como avena, cebada y arroz (Nasrollahzadeh et al., 2021; Chavan et al., 2016), siendo el primero el más común. Tiene un aporte calórico de 1-4 kcal/g. El β-glucano se extrae con agua a 65-100 °C, pero puede usarse temperaturas más bajas si la extracción se realiza con una solución de carbonato de sodio a pH 10; el extracto recuperado se seca por aspersión (BeMiller, 2019; Ahmad & Kaleem, 2018). Debido a su estructura molecular, el β-glucano tiene una alta capacidad de retención de agua y esto favorece sus propiedades tecnológicas como solubilidad, viscosidad y gelificación (Sun et al., 2021). El β-glucano no solo se usa por sus propiedades funcionales sino también por sus beneficios a la salud, incluida la prevención de diabetes (al reducir los niveles de insulina y glucosa plasmática posprandial) y reducción de la incidencia de enfermedades cardiovasculares (Li et al., 2021; Sun et al., 2021; Nakashima et al., 2018). El β-glucano se emplea como agente estabilizante, espesante, gelificante y emulsionante en productos bajos en grasa, como carne molida extramagra, salchichas, quesos, galletas, crema de coco, galletas, crema de calabaza

(Nasrollahzadeh et al., 2021; BeMiller, 2019; Ningtyas et al., 2018; Ahmad & Kaleem, 2018; Chavan et al., 2016)

#### **4. Ultrasonido de potencia: Generalidades**

##### **Definición**

El ultrasonido (US) es una tecnología no convencional utilizada en el procesamiento de alimentos, consiste en la propagación de ondas acústicas de presión longitudinales a través de un medio, a una frecuencia mayor a 20 kHz por lo que el oído humano no puede detectarlo (Fu et al., 2020; Yao et al., 2020). Las partículas presentes en el medio responden a estas ondas vibrando elásticamente y generando zonas de alta y baja presión, conocidas como zonas de compresión y rarefacción, respectivamente. Durante la compresión, las partículas del medio se comprimen haciendo que la presión y la densidad aumenten, mientras en la rarefacción sucede lo contrario, pues las partículas presentes se separan ocasionando que la presión y densidad disminuyan (Bermúdez-Aguirre et al., 2011).

##### **Clasificación del ultrasonido**

El US se dividen en tres zonas distintas según el rango de frecuencia y la cantidad de energía generada por el campo acústico: Ultrasonido de potencia o baja frecuencia (20-100 kHz), ultrasonido de baja intensidad o alta frecuencia (100 kHz-1 MHz) y ultrasonido de diagnóstico (>1MHz) (Yuan eta l., 2021, Chen et al. 2020). En la Figura 10 se puede observar la división de un espectro de sonido. El ultrasonido de diagnóstico se usa predominantemente en aplicaciones médicas (imagenología, cirugías de tejidos blandos, simulación de regeneración de tejidos, aumento en administración de medicamentos, entre otras) (Patey & Corcoran, 2020; Wischhusen & Padilla, 2019; Yasui, 2018; Hamada et al., 2016). A continuación, se describen las principales características del ultrasonido de potencia y de baja intensidad con énfasis en sus aplicaciones alimentarias.

**Ultrasonido de baja intensidad (LIUS).** Este tipo de ultrasonido hace referencia principalmente a ondas ultrasónicas que se generan a frecuencias mayores a 100 kHz e intensidades inferiores a  $1 \text{ W/cm}^2$  (Bhargava et al., 2021). Dado que la intensidad es baja, la longitud de onda emitida al medio y los ciclos de compresión y rarefacción son más cortos, por lo que el tiempo requerido para posibilitar el crecimiento y colapso de las burbujas es breve (Bermúdez-Aguirre, 2017) y solo provoca vibraciones en las moléculas del producto (Firouz et al., 2019), por lo que esta técnica es considerada no destructiva dados sus efectos mínimos sobre las matrices alimentarias y por la ausencia de cavitación (Fu et al., 2020; Chandrapala, 2015; Turantaş et al., 2015). En la industria alimentaria, el LIUS se usa para pruebas no destructivas, evaluación de materiales e imágenes y como una técnica de control de calidad (Yu et al., 2021; Chávez-Martínez et al., 2020; Gallego-Juárez, 2017); además, sus aplicaciones incluyen la evaluación de composición química de diversos productos (leche, productos cárnicos, pescados y aves crudos, productos fermentados) (Arvanitoyannis et al., 2017), la detección de adulteración en miel, monitoreo de crecimiento microbiano y reacciones enzimáticas, control de procesos de fermentación, gelificación y coagulación en leche, determinación de propiedades reológicas y de maduración en quesos y control de calidad en harinas, quesos, aceites, panes, frutas y hortalizas antes y después de la cosecha (Al Khawli et al., 2021; Chávez-Martínez et al., 2020; Khan et al., 2020; Khorshidi et al., 2019; Khorshidi, et al., 2018). El LIUS permite realizar mediciones a nivel laboratorio, así como en líneas de producción utilizando un sistema de medición robusto y económico (Natarajan et al., 2020; Awad et al., 2012). Sin embargo, en ciertos experimentos las propiedades físicas de los alimentos (composición, estructura y estado físico) puede afectar la velocidad, el coeficiente de atenuación y la impedancia acústica del LIUS emitida (Arvanitoyannis et al., 2017).

**Ultrasonido de potencia (USP).** El USP utiliza rangos de frecuencias de 20 a 100 kHz con una intensidad acústica superior a  $1 \text{ W/cm}^2$  (Carrillo-López et al., 2021; Zhou et al., 2021). Las aplicaciones de las ondas del USP se basan en la exploración eficaz de los fenómenos no lineales asociados con las altas amplitudes,

tales como la distorsión de la onda, la saturación acústica, la presión de radiación, el flujo acústico, la formación y movimiento de dislocaciones en sólidos y la *cavitación acústica*, siendo este último el principal fenómeno producido por ondas ultrasónicas de alta intensidad en un líquido (Yao et al., 2020; Gallego-Juárez, 2017; Gallego-Juárez & Graff, 2015). La cavitación acústica, es capaz de producir efectos físicos, químicos y mecánicos en la estructura de los alimentos y modificar sus propiedades fisicoquímicas, así como, destruir o alterar las paredes celulares de los microorganismos y de las enzimas durante el procesamiento (Akdeniz & Akalın, 2019; Sapozhnikov, 2015; Feng et al., 2011). En el procesamiento de alimentos, el USP se utiliza en una gran variedad de operaciones físicas y mecánicas como la de homogeneización, limpieza, desgasificación, aglomeración de partículas, reacciones sonoquímicas, reducción de espuma, filtración, secado, inhibición de microorganismos, emulsificación, extracción, congelación, liofilización, concentración, cristalización, entre otras (Khan et al., 2020; Akdeniz & Akalın, 2019; Gallego-Juárez, 2017; Paniwnyk, 2017; Awad et al., 2012; Tiwari & Mason, 2012). Al ser la base de muchas de las aplicaciones del USP, el fenómeno de cavitación y los efectos relacionados con el mismo se describen más adelante.

### **Equipo de ultrasonido: Descripción general**

Un equipo ultrasónico está compuesto por un generador como fuente de energía eléctrica el cual tendrá una potencia nominal específica; un transductor que convierte esa energía a energía sonora a frecuencias ultrasónicas (siendo el más común el transductor piezoeléctrico que se fabrica utilizando materiales cerámicos que responden a la energía eléctrica) (Yao et al., 2020; Kentish, 2017), y finalmente un emisor o reactor cuya función es irradiar y/o ampliar la onda ultrasónica desde el transductor al medio y se pueden dividir en dos tipos: de baño (aplicación indirecta) o de sonda (aplicación directa) (Al Khawli et al., 2021; Astráin-Redín et al., 2019; Guimarães et al., 2019). Los de baño cuentan con un tanque al que se le ha conectado uno o más transductores y las ondas sonoras generadas se propagan a través del medio líquido al que se encuentre sumergido el producto y el emisor de sonda se le acopla al transductor un amplificador de señal ultrasónica y un

dispositivo llamado sonotrodo, el cual irradia la onda ultrasónica hacia la muestra directamente (Hielscher Ultrasonics, 2021; Gallego-Juárez, 2017; Kentish & Ashokkumar, 2011). Independientemente del emisor empleado, este método considera que la energía acústica que llega al medio se pierde en forma de calor ocasionando un incremento de temperatura y, para evitar un sobrecalentamiento, se emplea un sistema de enfriamiento; el cambio de temperatura que se produce cuando el enfriamiento se desactiva temporalmente proporciona una medida precisa de la energía que se ha entregado al medio conocida como potencia acústica o potencia efectiva (P) y se determina multiplicando el cambio de temperatura (dT) en función del tiempo (dt) por la masa (m) y la capacidad calorífica del medio (Cp) (Ecuación 1) (Khan et al., 2020; Liu et al., 2019).

$$P = m C_p \left( \frac{dT}{dt} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Para el escalamiento de procesos es esencial calcular el coeficiente específico de energía (Ws/mL), el cual depende de la energía entregada (potencia efectiva en W) por unidad de volumen aplicada (mL) y por el tiempo total de exposición (s) (Ecuación 2).

$$Ev = \left( \frac{P t}{v} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

### **Ventajas y desventajas**

El US es considerado una técnica emergente se perciben como segura, no tóxica y amigable con el medio ambiente (Li et al., 2020), además de mostrar eficiencia en diversas aplicaciones, especialmente por la rapidez, precisión, selectividad, menor tiempo de operación, menor costo de mantenimiento y bajo consumo de energía (Khan et al., 2020; Li et al., 2019). En la tabla 11 se resumen las principales ventajas y desventajas del US. En los últimos años el US ha tomado mayor interés debido a que sus aplicaciones no solo se limitan a mejorar la calidad y los efectos de conservación de productos alimenticios, sino que también posibilita el desarrollo de nuevos productos y la optimización de procesos ya sea como alternativa o

complemento de técnicas convencionales (Khan et al., 2020; Natarajan, & Ponnusamy, 2020; Majid et al., 2015).

### **Cavitación Acústica**

La cavitación acústica es un fenómeno que ocurre particularmente en sistemas líquidos al experimentar fluctuaciones de ciclos alternos de presión (positivo y negativo), dando como resultados la formación, el crecimiento y el colapso de microburbujas dentro de la solución (Li et al., 2019; Gallego-Juárez, 2017). Este fenómeno inicia cuando la presión que fluctúa en el medio cae por debajo de la presión de vapor del líquido (presión negativa), provocando la formación de pequeñas burbujas (cavidades) (Pollet & Ashokkumar, 2019; Yasui, 2018a). Las burbujas se forman mediante; 1) la estabilidad de las burbujas ya existente, 2) la salida del gas atrapado en las partículas sólidas (motas) presentes en el líquido o en alguna grieta del recipiente que sale bajo la influencia de las fuerzas de radiación acústica y 3) por la fragmentación de una burbuja más grande (Leong et al., 2016). Posteriormente, las burbujas crecen hasta alcanzar un tamaño crítico conocido como *tamaño de resonancia* que depende en gran medida de la frecuencia aplicada. Las burbujas pueden crecer siguiendo dos mecanismos diferentes: 1) *por difusión rectificadas*, cuando las burbujas individuales crecen con el tiempo durante varios ciclos acústicos, haciendo que el gas y/o el vapor se difunda dentro y fuera de la burbuja debido a las diferencias de presión entre el interior y exterior de la burbuja durante la expansión y compresión (Yasui, 2018b; Leong et al., 2016) y 2) *por coalescencia* cuando una burbuja se encuentra con otra burbuja en la solución y se combinan para formar una burbuja más grande (Kentish & Feng, 2014). Cuando las burbujas alcanzan un tamaño crítico puede ocurrir dos eventos que clasifican la cavitación acústica como estable y transitoria (Tiwari & Mason, 2012). En la cavitación estable, las burbujas que se forman crecen de tamaño, pero no se colapsan, sino que se mantiene en equilibrio durante varios ciclos de presión acústica, permitiéndoles existir por un tiempo largo y suficiente para formar nubes de burbujas (Bermudez-Aquirre, 2017). En la cavitación transitoria, el campo acústico es más intenso y las burbujas crecen con mayor rapidez y luego implotan

de forma violenta generando burbujas de menor tamaño, dando lugar a aumentos de temperatura y presión localizados y transitorios a nivel molecular (conocido como *puntos calientes*) de hasta 5000 K y 1000 atm, respectivamente (Gevari et al., 2020; Senrayan & Venkatachalam, 2020; Li et al., 2019). Al mismo tiempo se forman microcorrientes derivadas de la implosión y de las corrientes que se generan de las oscilaciones no lineal de las burbujas. La fuerza de implosión de las burbujas y las microcorrientes que se generan tiene la capacidad de romper las superficies de los alimentos sólidos y facilitar la mezcla de componentes, así como causar fragmentación, erosión, sonoporación, efecto capilar, fuerzas de cizallamiento y turbulencia, y contribuir a la transferencia de calor y masa y provocar y/o potencializar reacciones químicas (Fu et al., 2020; Kentish, 2017). Sin embargo, la propagación de la cavitación acústica se ve influenciada por las características del medio de tratamiento (viscosidad, composición, presión de vapor, presencia de partículas, tensión superficial), las condiciones de procesamiento (presión, temperatura, presencia de gas) y las características de la fuente de ultrasonido (frecuencia, potencia, tamaño del reactor, geometría del reactor) (Bermúdez-Aguirre, 2017; Awad et al., 2012). Cada uno de estos factores se relacionan de una u otra manera, influyendo en la eficiencia del ultrasonido, creando condiciones durante y después de la cavitación para producir una serie de efectos como el calentamiento y las descargas eléctricas, así como reacciones conocidas como sonoluminiscencia (emisión de luz), quimioluminiscencia (reacciones químicas) y la producción de radicales libres. En el caso de la presión necesaria para comenzar la cavitación se ve afectada directamente por la viscosidad del líquido, ya que, si el líquido tiene una viscosidad alta, la presión requerida será mayor para iniciar la producción de burbujas. A frecuencias de entre 80-100 kHz, el número de puntos calientes es mayor y el tamaño de las burbujas es menor, ocasionando que la liberación de energía sea menor. A esta frecuencia se tiene un efecto químico más fuerte y produce mayor cantidad de  $\text{OH}^-$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ , lo que lleva a la formación de diversos compuestos (en ocasiones indeseables) en alimentos específicos durante la sonicación (Al Khawli et al., 2021; Astráin-Redín et al., 2019; Bermúdez-Aguirre,

2017). Las frecuencias más bajas generan burbujas más grandes y por lo tanto un colapso más violento con temperaturas y presiones localizadas más altas. En cuanto a la temperatura, es muy común utilizar ultrasonido junto con un tratamiento térmico suave (conocido como termosonicación) en la industria alimentaria con la finalidad de reducir la viscosidad del líquido y la presión requerida para iniciar y hacer para eficiente la cavitación (Firouz et al., 2019; Chemat et al., 2017; Farhadi Chitgar et al., 2017; Kentish & Feng, 2014). Cabe mencionar que, no solo la temperatura es usada a favor, ya que diversos reportes han emplean procesos asistidos con otras barreras de conservación con ultrasonido, a saber, presión (Feng et al., 2020;), combinación de presión y temperatura (Deivendran et al., 2021; Puri et al., 2018; Meullemiestre et al., 2017) y uso de algunos agentes químicos, enzimáticos y/o microbianos (Olawuyi et al., 2020). Por otra parte, diversos investigadores han explorado el uso del USP en procesos de extracción y otras operaciones donde el ultrasonido funge como un acelerar de fenómenos de transporte de masa (Kumar et al., 2021; Setyaningsih et al., 2019; Chemat et al., 2017). Recientemente se ha propuesto el uso del ultrasonido de potencia como una herramienta para modular las propiedades tecnológico-funcionales de diferentes polímeros alimenticios. Las matrices alimenticias exploradas y sus principales hallazgos se describen con amplitud en el siguiente apartado.

## **5. Uso de ultrasonido de potencia para modulación de propiedades tecnológico-funcionales de polímeros alimenticios**

Los biopolímeros utilizados como miméticos de grasa juegan un papel muy importante en los sistemas alimenticios, no solo por su valor nutricional, sino por sus propiedades tecnológico-funcionales. Como se describió anteriormente, las propiedades funcionales de estos miméticos no solo están definidas por sus características fisicoquímicas y estructurales (factores intrínsecos), sino que también por las condiciones de procesamiento (factores extrínsecos) y la interacción con otros componentes en los alimentos. En los últimos años se ha intensificado la

necesidad de mejorar o modular sus propiedades funcionales con la finalidad de optimizar, diseñar y fabricar alimentos de calidad y que exhiban cierta función deseada. Cabe mencionar que los métodos convencionales (químicos, enzimáticos, térmico) son ampliamente usados para mejorar estas propiedades; sin embargo, estos presentan algunas desventajas, incluyendo el alto consumo de energía, la degradación o pérdida de estructura de algunos componentes, la disminución del valor nutricional y el desarrollo de compuestos tóxicos, razón por la cual, se dio a la tarea de desarrollar tecnologías *nuevas* no térmicas que pudiesen minimizar los efectos antes mencionados. El USP es una tecnología que hoy en día se ha explorado intensamente debido a su versatilidad para la alteración, generación y modificación de microestructuras, sin el uso de agentes químicos o tratamientos térmicos; diversas investigaciones han demostrado que la aplicación de USP permite modular las características funcionales de distintos biopolímeros alimenticios a través de los efectos inducidos por el mecanismo de cavitación (Ashfaq et al., 2021; Vela et al., 2021; Wang et al., 2020). La propagación de ondas acústicas en las soluciones de biopolímeros induce cambios significativos en propiedades selectas, incluyendo las capacidades gelificante, espesante, emulsificante, espumante, de solubilidad y retención de agua y aceite y de formación de películas, así como en sus propiedades estructurales y actividades biológicas (Lin et al., 2021). Los cambios generados en las propiedades funcionales pueden repercutir positiva y/o negativamente en las propiedades fisicoquímicas de los alimentos y en su uso como miméticos de grasa; por ello, para obtener los resultados deseados es importante determinar las condiciones de sonicación adecuadas (frecuencia, intensidad, temperatura, tiempo de ultrasonido, diseño del equipo) y conocer el tipo y estructura de los biopolímeros tratados (Kang et al., 2021; Meng et al., 2021, Wang et al., 2020). Siguiendo este contexto, esta sección aborda el uso del USP para modificar las propiedades tecnológico-funcionales de polímeros alimenticios y las condiciones de procesamiento en las que se lleva a cabo la modificación.

### **Modificación de propiedades tecnológico-funcional de proteínas**

La modificación que ocurre en la funcionalidad tecnológica de los biopolímeros alimenticios de origen proteico se debe principalmente a la ruptura y/o desdoblamiento de la estructura molecular de las proteínas (cuaternaria y/o terciarias) (Jambrak, 2017; Weiss et al. 2011). Como se mencionó anteriormente, el impacto que tiene el USP en las propiedades estructurales y conformacionales de las proteínas se atribuyen al fenómeno de cavitación, donde la acumulación de energía generada en los puntos calientes conducen a la desnaturalización parcial de las proteínas, es decir, la cavitación crea suficiente fuerza de corte para romper los enlaces intermoleculares (como los enlaces disulfuros e interacciones hidrofóbicas), lo que reduce su tamaño medio (rompieron los enlaces peptídicos) y la distribución de las partículas de proteínas (Kang et al., 2021; Rahman & Lamsal, 2021). El desdoblamiento de la estructura molecular aumenta la hidrofobicidad superficial al exponer grupos y regiones hidrofóbicos ocultos dentro de las moléculas y mostrarlas a un entorno más polar (Corzo-Martínez et al.,2017). Sin embargo, varios estudios muestran que el cizallamiento provocado por la cavitación puede alterar la estructura terciaria, pero deja intactos la mayoría de las estructuras secundarias (Carrillo-López et al., 2021) y en algunos casos logra reducir la hidrofobicidad superficial y aumentar el tamaño de partícula por agregación proteica causada por la formación de interacciones no covalentes incluyendo interacciones electrostáticas e hidrofóbicas; cabe mencionar que la solubilidad afecta a varias de las propiedades funcionales de las proteínas (Kang et al., 2021).

Diversos grupos de investigadores han estudiado el efecto del USP en proteínas de origen animal. Resultados recientes se muestran en la Tabla 12. Es importante hacer notar que el grado de modificación de la estructura dependerá de las condiciones de procesamiento y naturaleza de la proteína. Así, Meng et al., (2021) estudiaron los efectos de sonicación del WPC (20 kHz, 600 W, 10, 20, 30 y 40 min, pH 7, 3±1 °C) sobre su estructura y propiedades funcionales; el USP provocó el desdoblamiento de estructuras secundarias y terciarias, y aumento significativo en el contenido de espirales  $\beta$  y en la hidrofobicidad superficial y, en consecuencia, una mejora en las propiedades espumantes, emulsionantes y

antioxidantes del WPC. El tratamiento con USP (20 kHz, 25 °C, 2-14 min) que emplearon Stefanović et al., (2017) redujo el tamaño promedio de las proteínas y mejoró proporcionalmente la solubilidad de las EWP (10% p/p, pH 8); la capacidad y estabilidad de espuma aumentó de forma inversamente proporcional al tamaño de partícula (370-260 nm), al igual que la capacidad emulsificante con el aumento de tiempo de sonicación. La cavitación acústica provocó la liberación de la lisozima de la red de ovomucina rompiendo la atracción electroestática y convirtiéndola en soluble (Gharbi & Labbafi, 2018). Por otro lado, Xiong et al., (2016) aplicaron un tratamiento USP (20 kHz, 20 min) en EWP que provocó la exposición de grupos sulfhídricos libres e hidrófobos, aumentando su hidrofobicidad superficial, afectando negativamente la tensión de la interfaz aceite-agua y aire-agua; el incremento del tamaño de partícula se atribuyó a la formación de agregados de proteína, los cuales podrían afectar las propiedades de formación de espuma de EWP. Sheng et al. (2018) investigaron los efectos del USP (20 kHz) con tratamientos de potencia variables (90-480 W por 10 min) sobre la estructura molecular y la capacidad de formación de espuma de la EWP, donde observaron que el estado de agregación y la morfología de la superficie habían cambiado, debido al despliegue parcial de EWP y a la exposición de grupos hidrofóbicos y sulfhidrilos (valor máximo a 240 W), y al consecuente aumento en solubilidad y capacidad de formación de espuma (260% a 360 W); además, el aumento de su hidrofobicidad superficial y la reducción del tamaño de partícula y la viscosidad se le atribuyó a la degradación de la ovomucina. Ding et al. (2021) realizaron el mismo tratamiento con USP en EWP a diferentes potencias (120-480W) pero incrementando el tiempo de proceso a 30 min, provocando cambios notorios en las características físicas y funcionales de la proteína, incluyendo el desdoblamiento de la estructura molecular, la alteración de las fuerzas intermoleculares, la reducción de tamaño de partícula y viscosidad, el incremento de la dispersión y la capacidad de formación de espuma.

Zhang et al. (2021) estudiaron los efectos del pretratamiento con USP (20 kHz, 69 W cm<sup>-2</sup>, 10-40 min) en WPI antes de su incubación con transglutaminasa; los resultados mostraron que el tratamiento por USP puede aumentar la cantidad

de polímeros y agregados de alto peso molecular, así como el grado de entrecruzamiento, validado mediante la disminución del contenido de grupos aminos; además, la viscosidad, índice de consistencia, capacidad de retención de agua y resistencia de los geles se vieron notablemente mejorados por el tratamiento ultrasónico. Lara-Castellanos et al., 2021 demostraron que la cavitación acústica puede causar la ruptura, división de los monómeros y cambios en la estructura terciaria y cuaternaria de las proteínas de MCC, provocando la agregación y formación de poros pequeños en la superficie, justificando de esta forma el incremento en la capacidad de retención de agua (de un 11.95%) y aceite (41.87%), solubilidad (83.20%), capacidad emulsionante (53.64%), de hinchamiento (88.66%) y potencial Z (38.55%) y hace promisorio su aplicación en diversos productos lácteos. El USP también ha sido explorado para mejorar la dispersabilidad y funcionalidad en proteínas de origen vegetal, así como Omura et al., (2021) investigaron los efectos de diferentes concentraciones de proteínas durante el procesamiento ultrasónico (20 kHz, 562.5, 637.5 o 712.5 W, 120, 360 o 600 s) del SPI y PPC a 1, 3 y 5% (p/v), y observaron que para SPI la máxima dispersabilidad y formación de espuma se obtiene a 712.5 W, 600 s, 10% p/v, y para SPI, la capacidad de retención de agua y aceite fue a 562.5 W, 120 s, 5% p/v y 562.5 W, 120 s, 1.0% p/v, respectivamente, demostrando que los máximos valores que se pueden obtener durante la modulación de las propiedades tecno-funcionales de las proteínas no serán los mismos para las distintas proteínas, a pesar de que se sometan al mismo tratamiento ultrasónico.

Sha et al. (2021), investigaron las propiedades estructurales, interfaciales y emulsionantes del PPI tratado con USP (20-60 W/cm<sup>2</sup>, 1- 5 min, < 35 °C) y observaron incremento en la solubilidad (132%), la hidrofobicidad de la superficie (173%) y reducción del tamaño de partícula (52%), ocasionando la adsorción más rápida de proteínas en la interfase aceite-agua, así como el incremento en la actividad (18-27%) y capacidad (11%) emulsionante, aptas para su uso en la fabricación de productos emulsionados. Las proteínas juegan un papel muy importante en el procesamiento de alimentos, por lo que es significativo determinar

las condiciones de sonicación, tan precisas como sea posible, y poder generar cambios favorables en la estructura y en la funcionalidad, para evitar los efectos de la degradación total sobre las actividades de los biopolímeros.

### **Modificación de propiedades tecnológico-funcionales de biopolímeros de carbohidratos**

La modulación de las propiedades tecnológico-funcionales de los polisacáridos por medio de USP se relacionan principalmente con la alteración estructural y reducción en su peso molecular promedio, ya que generalmente estos poseen una estructura lineal rígida, aunque también pueden encontrarse estructuras en forma de espirales aleatorias o hélices ordenados bajo ciertas condiciones (Weiss et al., 2011). Durante el uso del USP en polímeros de carbohidratos, la cavitación generada provoca el rompimiento de las cadenas de polímeros ubicados en el centro de la molécula, siendo el punto estructuralmente más débil, donde las moléculas de mayor peso y longitud (de cadena larga) se rompen con mayor frecuencia que las cadenas de menor tamaño. Las cadenas lineales se sonifican más fácilmente que las cadenas ramificadas y, a medida que los polímeros se descomponen, se llega a un punto en el que las cadenas se vuelven cortas alcanzando un límite de peso molecular bajo y un máximo de degradación (Ogutu et al., 2015). Cabe mencionar que, los carbohidratos de bajo peso molecular son responsables de diversas propiedades sensoriales características de los alimentos, y un aumento en su peso molecular debido a la unión de ciertos grupos funcionales tienen un impacto en las propiedades tecnológico-funcionales de estos polímeros (Soria et al., 2017; Ogutu et al., 2015). La despolimerización o reducción de tamaño de los polisacáridos mediante el uso de USP tiene como consecuencia la alteración de sus propiedades fisicoquímicas y funcionales, así como en el rendimiento de despolimerización, tiempo de proceso y en la formación de reacciones químicas, incluyendo la glicosilación, acetalización, oxidación, formaciones de enlaces C–D, C-heteroátomo y C–C (Weiss et al., 2011); sin embargo, esto estará sujeto a parámetros intrínsecos y extrínsecos del proceso

de sonicación. Los cambios observados en los polisacáridos pueden ser beneficiosos o perjudiciales con respecto a una funcionalidad particular, por ejemplo, el USP puede mejorar la digestibilidad de un polisacárido o disminuir la capacidad del mismo polisacárido para espesar una solución (Weiss et al., 2011). La estructura molecular y flexibilidad de los biopolímeros influyen significativamente en los tratamientos ultrasónicos. La modificación estructural de los polisacáridos provocada por la cavitación acústica desencadena una serie de efectos sobre la funcionalidad de los polímeros; es decir, al modificar los grupos laterales y reducir el tamaño de los polímeros, se producen fragmentos más pequeños que pueden mejorar su solubilidad y, en algunos casos, el USP puede contribuir a su dispersión, mejorando la dinámica de los fluidos y/o alterando las estructuras cristalinas; la reactividad de los polisacáridos se debe a la modificación de los grupos laterales unidos a la columna vertebral del polisacárido, produciendo  $H\bullet$ ,  $OH\bullet$  y óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) durante la cavitación, que pueden reaccionar y/o recombinarse con otros compuestos orgánicos y formas nuevas; la viscosidad puede disminuir, debido a la disminución del peso molecular de los polisacáridos tratados con ultrasonido, ya que las moléculas de cadena larga conducen a una mayor viscosidad en la solución y suele afectar la velocidad de la cavitación acústica (Ogotu et al., 2015). Sin embargo, se ha observado que el uso de USP suele tener un efecto negativo sobre la capacidad de los polisacáridos para formar geles; esto se debe a que el peso molecular es un parámetro clave en la formación de geles y los carbohidratos de alto peso molecular forman geles más fuertes a menor concentración, pero al reducir el peso molecular promedio los geles se debilitan. Sin embargo, se ha observado que la capacidad de los polisacáridos para formar geles puede no verse afectada por el USP, si este se utiliza como parte del procedimiento de extracción (extracción asistida por ultrasonido) en lugar de como tratamiento posterior a la misma; esto permite inducción de cambios significativos en las propiedades funcionales de estos biopolímeros (Rahman & Lamsal, 2021; Wang et al., 2021; Wang et al., 2020). La degradación de la estructura molecular de los biopolímeros se han convertido en una estrategia para la obtención de ingredientes modificados,

contribuyendo de esta manera a la modulación de propiedades funcionales; en este sentido Wang et al. (2021) examinaron cambios en las propiedades funcionales en pectinas cítricas nativas tratadas con USP (20 kHz, 104.7 W/cm<sup>2</sup>, 30°C, 5-60 min), observando cambios estructurales y conformacionales del polímero así como incremento en la formación y estabilidad de emulsiones; sin embargo la reducción del peso molecular y alteración en la conformación de la cadena de las pectinas redujeron la capacidad de formación de geles. Por otra parte Li et al., (2022) concluyeron que la disminución de la cristalinidad y temperatura de gelatinización y retrogradación, el incremento de la entalpia de gelatinización ( $9.85 \pm 0.31$  J/g), viscosidad final ( $262.61 \pm 1.09$  RVU) y de degradación ( $123.22 \pm 3.01$  RVU) en almidón de arroz tratado ultrasónicamente (300 W, 30 min) fue como consecuencia de los cambios estructurales en la superficie de los gránulos de almidón, la reducción y uniformidad del tamaño de partícula y la alteración de las estructuras de amilosa y amilopectina. Motamedzadegan et al. (2021) emplearon la extracción asistida por USP (0-400 W, 3-7 min) de  $\beta$ -glucano de avena, en la que los resultados mostraron que la intensidad y el tiempo del ultrasónico fueron significativos en el incremento del rendimiento (52.04%), recuperación, estabilidad de la emulsión (69.06%), solubilidad (75.67%) y capacidad de retención de agua (13.21 g/g), concluyendo que la extracción ultrasónica, representa una alternativa de mayor eficiencia y rentabilidad, acortando el tiempo de extracción, y reduciendo el consumo de energía y solvente en comparación con los métodos convencionales. En la Tabla 13 se resumen resultados recientes de investigaciones realizadas en la modificación estructural y modulación de propiedades funcionales de distintos polisacáridos.

## **6. Uso de polímeros alimenticios pretratados por USP como miméticos de grasa en alimentos**

El tratamiento con USP podría brindar la posibilidad de crear nuevas y/o mejorar alimentos con propiedades deseables debido a la modificación de la estructura de

estos biopolímeros. Anteriormente, se describió del proceso de obtención de distintos polímeros alimenticios empleados como miméticos de grasa, así como el uso de la cavitación acústica del USP para alterar la conformación y estructura molecular y provocar efectos en sus propiedades tecnológico-funcionales, siendo la base teórica para optimizar el procesamiento de alimentos. Sin embargo, la aplicación industrial de estos biopolímeros modificados sigue siendo un reto, por lo que es importante evaluar las propiedades fisicoquímicas y funcionales en matrices alimentarias. En la tabla 14 se resume las principales mejoras de los miméticos de grasa modificados por USP en distintos alimentos.

## **7. Perspectivas a futuro y conclusiones**

El USP es una tecnología que ha tomado relevancia dentro de la investigación científica; se han logrado grandes avances con respecto a su comprensión en los mecanismos de aplicación, especialmente para la modificación estructural y tecnológico-funcional de biopolímeros que potencialmente pueden ser empleados como miméticos de grasa. Todos los cambios fisicoquímicos y funcionales que se manifiestan en las proteínas y polisacáridos están relacionadas con la alteración en la estructura molecular como efecto de la cavitación acústica. El tratamiento de biopolímeros con USP afecta los enlaces intra e intermoleculares, es decir aquellos enlaces no covalentes que mantiene la estructura molecular intacta, reduciendo su tamaño; la mayoría de los autores indicaron que estas alteraciones ocasionaban mejoras en las propiedades de gelificación (dureza, reticulación, cohesividad, elasticidad, fuerza y capacidad de retención de agua), aumento en la hidrofobicidad y solubilidad de la superficie, mejoras en la capacidad de formación y estabilidad de la espumas y emulsiones. Sin embargo, para lograr los resultados esperados se debe de determinar las condiciones óptimas de procesamiento que incluyen frecuencia, intensidad, tiempo, temperatura de aplicación, diseño de la unidad de ultrasonido y el tipo y estructura de los biopolímeros. Cabe mencionar que, aunque se han realizado numerosas investigaciones, su análisis en matrices alimenticias es

limitada y para tener una mayor comprensión del mecanismo, es necesario explorar su funcionalidad en distintos alimentos.

## 8. Referencias bibliográficas

5 al día (2021). Retrieved 13 April 2021, from <https://www.5aldia.org/>

Abbas, H., Hammad, M. N., & Elsaba, N. (2021). Evaluation Of Low Calories Ice Cream Properties Prepared By Using Fat Replacer And Sweetener. *Egyptian Journal of Chemistry*.

Aggarwal, D., Sabikhi, L., Kumar, M. S., & Panjagari, N. R. (2018). Investigating the effect of resistant starch, polydextrose and biscuit improver on the textural and sensory characteristics of dairy-multigrain composite biscuits using response surface methodology. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(2), 1167-1176.

Aguilar-Acosta, L. A., Serna-Saldivar, S. O., Rodríguez-Rodríguez, J., Escalante-Aburto, A., & Chuck-Hernández, C. (2020). Effect of ultrasound application on protein yield and fate of alkaloids during lupin alkaline extraction process. *Biomolecules*, 10(2), 292.

Ahmad, A., & Kaleem, M. (2018).  $\beta$ -Glucan as a Food Ingredient. In *Biopolymers for food design* (pp. 351-381). Academic Press.

Ahmad, T., Ismail, A., Ahmad, S. A., Khalil, K. A., Awad, E. A., Leo, T. K., ... & Sazili, A. Q. (2018). Characterization of gelatin from bovine skin extracted using ultrasound subsequent to bromelain pretreatment. *Food Hydrocolloids*, 80, 264-273.

Ahmad, T., Ismail, A., Ahmad, S. A., Khalil, K. A., Kumar, Y., Adeyemi, K. D., & Sazili, A. Q. (2017). Recent advances on the role of process variables affecting gelatin yield and characteristics with special reference to enzymatic extraction: A review. *Food hydrocolloids*, 63, 85-96.

Ahmadi, Z., Razavi, S. M. A., & Varidi, M. (2017). Sequential ultrasound and transglutaminase treatments improve functional, rheological, and textural properties of whey protein concentrate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 43, 207-215.

Ahmed, W., & Rashid, S. (2019). Functional and therapeutic potential of inulin: A comprehensive review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 59(1), 1-13.

- Ai, M., Zhang, Z., Fan, H., Cao, Y., & Jiang, A. (2021). High-intensity ultrasound together with heat treatment improves the oil-in-water emulsion stability of egg white protein peptides. *Food Hydrocolloids*, 111, 106256.
- Akbari, M., Eskandari, M. H., & Davoudi, Z. (2019). Application and functions of fat replacers in low-fat ice cream: A review. *Trends in food science & technology*, 86, 34-40.
- Akdeniz, V., & Akalin, A. S. (2019). New approach for yoghurt and ice cream production: High-intensity ultrasound. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 392-398.
- Akesowan, A. (2009). Influence of soy protein isolate on physical and sensory properties of ice cream. *Thai Journal of Agricultural Science*, 42(1), 1-6.
- Akoh, C. C. (2002). Lipid-based synthetic fat substitutes. *Food lipids: chemistry, nutrition, and biotechnology*, (Ed. 2), 695-727.
- Akoh, C. C. (2007). Fat-based fat substitutes. *Fatty Acids in Foods and their Health Implications*, 461-471.
- Akram, A. N., & Zhang, C. (2020). Extraction of collagen-II with pepsin and ultrasound treatment from chicken sternal cartilage; physicochemical and functional properties. *Ultrasonics sonochemistry*, 64, 105053.
- Al Khawli, F., Zhou, J., Wang, M., Lorenzo, J. M., Munekata, P. E., Ferrer, E., & Barba, F. J. (2021). Mind the gap in the knowledge of the potential food applications of ultrasound based on its mechanism of action. In *Design and optimization of innovative food processing techniques assisted by ultrasound* (pp. 1-13). Academic Press.
- Alaei, F., Hojjatoleslami, M., & Hashemi Dehkordi, S. M. (2018). The effect of inulin as a fat substitute on the physicochemical and sensory properties of chicken sausages. *Food science & nutrition*, 6(2), 512-519.
- Al-Ali, H. A., Shah, U., Hackett, M. J., Gulzar, M., Karakyriakos, E., & Johnson, S. K. (2021). Technological strategies to improve gelation properties of legume proteins with the focus on lupin. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 102634.
- Alarcón-Rojo, A. D., Carrillo-López, L. M., Reyes-Villagrana, R., Huerta-Jiménez, M., & Garcia-Galicia, I. A. (2018). Ultrasound and meat quality: A Review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 55,369-382.

- Alavi, F., & Chen, L. (2021). Complexation of nanofibrillated egg white protein and low methoxy pectin improves microstructure, stability, and rheology of oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*, 107262.
- Alexandretti, C., Verlindo, R., De Souza Hassemer, G., Manzoli, A., Souza Roman, S., Aparecida Fernandes, I., ... & Valduga, E. (2019). Structural and Techno-Functional Properties of Bovine Collagen and Its Application in Hamburgers. *Food technology and biotechnology*, 57(3), 369-377.
- Ali, T. M., Waqar, S., Ali, S., Mehboob, S., & Hasnain, A. (2015). Comparison of textural and sensory characteristics of low-fat mayonnaise prepared from octenyl succinic anhydride modified corn and white sorghum starches. *Starch-Stärke*, 67(1-2), 183-190.
- Alibhai, Z., Mondor, M., Moresoli, C., Ippersiel, D., & Lamarche, F. (2006). Production of soy protein concentrates/isolates: traditional and membrane technologies. *Desalination*, 191(1-3), 351-358.
- Alipal, J., Pu'ad, N. M., Lee, T. C., Nayan, N. H. M., Sahari, N., Basri, H., ... & Abdullah, H. Z. (2021). A review of gelatin: Properties, sources, process, applications, and commercialisation. *Materials Today: Proceedings*.
- Al-Nawassrah, B. A. A., & Al-Abdullah, B. (2020). Assessment of functional properties of beef collagen powder and sodium tri-polyphosphate on the physiochemical, water holding capacity, texture and sensory properties of beef burger. *EurAsian Journal of Biosciences*, 14(2).
- Alu'datt, M. H., Rababah, T., Alhamad, M. N., Ereifej, K., Gammoh, S., Kubow, S., & Tawalbeh, D. (2017). Preparation of mayonnaise from extracted plant protein isolates of chickpea, broad bean and lupin flour: chemical, physiochemical, nutritional and therapeutic properties. *Journal of food science and technology*, 54(6), 1395-1405.
- Alvarez, V. B., Wolters, C. L., Vodovotz, Y., & Ji, T. (2005). Physical properties of ice cream containing milk protein concentrates. *Journal of Dairy Science*, 88(3), 862-871.
- Alves, A. C., & Tavares, G. M. (2019). Mixing animal and plant proteins: Is this a way to improve protein techno-functionalities?. *Food Hydrocolloids*, 97, 105171.
- Amador-Espejo, G. G., Ruiz-Lopez, I. I., Gibbens-Bandala, P. J., Delgado-Macuil, R. J., & Ruiz-Espinosa, H. (2021). Thermosonicated whey protein concentrate blends on quality attributes of reduced fat Panela cheese. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105621.

- Amagliani, L., & Schmitt, C. (2017). Globular plant protein aggregates for stabilization of food foams and emulsions. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 248-259.
- Amelia, I., & Barbano, D. M. (2013). Production of an 18% protein liquid micellar casein concentrate with a long refrigerated shelf life. *Journal of dairy science*, 96(5), 3340-3349.
- Amelia, I., Drake, M., Nelson, B., & Barbano, D. M. (2013). A new method for the production of low-fat Cheddar cheese. *Journal of dairy science*, 96(8), 4870-4884.
- Anderson, T. J., & Lamsal, B. P. (2011). Zein extraction from corn, corn products, and coproducts and modifications for various applications: a review. *Cereal Chemistry*, 88(2), 159-173.
- Anderson-Dekkers, I., Nouwens-Roest, M., Peters, B., & Vaughan, E. (2021). Inulin. In *Handbook of Hydrocolloids* (pp. 537-562). Woodhead Publishing.
- Anvari, M., & Joyner, H. S. (2018). Concentrated emulsions as novel fat replacers in reduced-fat and low-fat Cheddar cheeses. Part 1. Rheological and microstructural characterization. *International Dairy Journal*, 86, 76-85.
- Anvari, M., & Joyner, H. S. (2019). Concentrated emulsions as novel fat replacers in reduced-fat and low-fat Cheddar cheeses. Part 2. Large amplitude oscillatory shear behavior. *International Dairy Journal*, 91, 137-146.
- Arango, O., Trujillo, A. J., & Castillo, M. (2020). Influence of fat substitution by inulin on fermentation process and physical properties of set yoghurt evaluated by an optical sensor. *Food and Bioproducts Processing*, 124, 24-32.
- Araújo, Í. B., Lima, D. A. S., Pereira, S. F., Paseto, R. P., & Madruga, M. S. (2021). Effect of storage time on the quality of chicken sausages produced with fat replacement by collagen gel extracted from chicken feet. *Poultry Science*, 100(2), 1262-1272.
- Araújo, Í. B., Lima, D. A., Pereira, S. F., & Madruga, M. S. (2019). Quality of low-fat chicken sausages with added chicken feet collagen. *Poultry science*, 98(2), 1064-1074.
- Artz, W. E., Lai, L. L., & Hansen, S. L. (2007). The chemistry and nutrition of nonnutritive fats. In *Deep frying* (pp. 229-249). AOCS Press

- Artz, W. E., Soheili, K. C., & Arjona, I. M. (1999). Esterified propoxylated glycerol soyate, a fat substitute model compound, and soy oil after heating. *Journal of agricultural and food chemistry*, 47(9), 3816-3821.
- Arvanitoyannis, I. S., Kotsanopoulos, K. V., & Savva, A. G. (2017). Use of ultrasounds in the food industry—Methods and effects on quality, safety, and organoleptic characteristics of foods: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(1), 109-128.
- Asgari, K., Labbafi, M., Khodaiyan, F., Kazemi, M., & Hosseini, S. S. (2020). High-methylated pectin from walnut processing wastes as a potential resource: Ultrasound assisted extraction and physicochemical, structural and functional analysis. *International journal of biological macromolecules*, 152, 1274-1282.
- Ashaolu, T. J. (2020). Applications of soy protein hydrolysates in the emerging functional foods: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 55(2), 421-428.
- Ashfaq, A., Jahan, K., Islam, R. U., & Younis, K. (2021). Protein-based functional colloids and their potential applications in food: A review. *LWT*, 112667.
- Ashogbon, A. O., & Akintayo, E. T. (2014). Recent trend in the physical and chemical modification of starches from different botanical sources: A review. *Starch-Stärke*, 66(1-2), 41-57.
- Assadpour, E., & Jafari, S. M. (2019). An overview of biopolymer nanostructures for encapsulation of food ingredients. *Biopolymer nanostructures for food encapsulation purposes*, 1-35.
- Astráin-Redín, L., Raso, J., Condón, S., Cebrián, G., & Álvarez, I. (2019). Application of high-power ultrasound in the food industry. In *Sonochemical Reactions*. IntechOpen.
- Ataie, M. J., Shekarabi, S. P. H., & Jalili, S. H. (2021). Gelatin from bones of bighead carp as a fat replacer on physicochemical and sensory properties of low-fat mayonnaise. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2021, 979-983.
- Atashkar, M., Hojjatoleslami, M., & Sedaghat Boroujeni, L. (2018). The influence of fat substitution with  $\kappa$ -carrageenan, konjac, and tragacanth on the textural properties of low-fat sausage. *Food science & nutrition*, 6(4), 1015-1022.
- Ateteallah, H. A., Abd-Alla, A. A., Ateteallah, A. H., & Hassan, N. A. (2020). Physicochemical and Sensory Properties of Low-Fat Ice Cream Made with Inulin and Maltodextrin as Fat Replacers. *الفشدية للمثلجات والحسية والكيميائية الفيزيائية الخواص*

لدهن كبدايل والمالتودكستريين الإنيولين من المصنعة الدهن منخفضة *Journal of Food and Dairy Sciences*, 11(6), 151-156.

Auerbach, M. H., Klemann, L. P., & Heydinger, J. A. (2001). Reduced energy lipids. *Structured and modified lipids*, 485-510.

Augustin, M. A., Oliver, C. M., & Hemar, Y. (2011). Casein, caseinates, and milk protein concentrates. *Dairy ingredients for food processing*, 1, 161-178.

Avelar, Z., Vicente, A. A., Saraiva, J. A., & Rodrigues, R. M. (2021). The role of emergent processing technologies in tailoring plant protein functionality: New insights. *Trends in Food Science & Technology*.

Avérous, L., & Halley, P. J. (2014). Starch polymers: From the field to industrial products. In *Starch polymers* (pp. 3-10). Elsevier.

Avramia, I., & Amariei, S. (2021). Spent Brewer's Yeast as a Source of Insoluble  $\beta$ -Glucans. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(2), 825.

Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D. Y. M. M., & Youssef, M. M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food research international*, 48(2), 410-427.

Aydinol, P., & Ozcan, T. (2018). Production of reduced-fat Labneh cheese with inulin and  $\beta$ -glucan fibre-based fat replacer. *International Journal of Dairy Technology*, 71(2), 362-371.

Aziz, N. S., Sofian-Seng, N. S., Yusop, S. M., Kasim, K. F., & Razali, N. S. M. (2018). Functionality of okra gum as a novel carbohydrate-based fat replacer in ice cream. *Food Science and Technology Research*, 24(3), 519-530.

Azmoon, E., Saberi, F., Kouhsari, F., Akbari, M., Kieliszek, M., & Vakilinezam, A. (2021). The effects of hydrocolloids-protein mixture as a fat replacer on physicochemical characteristics of sugar-free muffin cake: Modeling and optimization. *Foods*, 10(7), 1549.

Babu, A. S., Parimalavalli, R., & Mohan, R. J. (2018). Effect of modified starch from sweet potato as a fat replacer on the quality of reduced fat ice creams. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(4), 2426-2434.

Bacenetti, J., Bava, L., Schievano, A., & Zucali, M. (2018). Whey protein concentrate (WPC) production: Environmental impact assessment. *Journal of Food Engineering*, 224, 139-147.

- Bagheri, F., Radi, M., & Amiri, S. (2018). Evaluating the function of cross-linked rice starch as a fat replacer in low fat cream. *International journal of dairy technology*, 71(4), 981-991.
- Bajaj, R., Singh, N., & Kaur, A. (2019). Properties of octenyl succinic anhydride (OSA) modified starches and their application in low fat mayonnaise. *International journal of biological macromolecules*, 131, 147-157.
- Bansal, N., & Bhandari, B. (2016). Functional milk proteins: Production and utilization—whey-based ingredients. In *Advanced dairy chemistry* (pp. 67-98). Springer, New York, NY.
- Barekati, M., Beigmohammadi, Z., & Shahiri, T. H. (2018). Study on the Quality of Low-fat Chicken Burger Formulated by Carboxy Methyl Cellulose and Potato Starch.
- Baron, R. D., Churio, C. J. G., & Bermúdez, J. (2020). Addition of high esterification pectin as a stabilizer in the production of low fat yogurt. *ITEGAM-JETIA*, 6(26), 13-17.
- Barros, J. H. T., de Carvalho Oliveira, L., Cristianini, M., & Steel, C. J. (2021). Non-thermal emerging technologies as alternatives to chemical additives to improve the quality of wheat flour for breadmaking: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-17.
- Baruah, U., & Bhattacharyya, R. (2017). Fat Replacers in Food Production. *International Journal of Food, Nutrition and Dietetics*.
- Bazrafshan, M., Shafafizenoozian, M., & Moghimi, M. (2015). Effect of soy protein isolate, guar gum and *Ocimum basilicum* seed powder as replacers of fat on porosity, color and texture of muffin cake. *Bulltein Environment Pharmacology and Life Science*, 4, 23-29.
- Bean, S. R., Akin, P. A., & Aramouni, F. M. (2021). Zein functionality in viscoelastic dough for baked food products. *Journal of Cereal Science*, 103270.
- Bechtel, D. H. (2014). Article series: Safety of esterified propoxylated glycerol (EPG), a nonabsorbable fat replacer. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 70, S91-S94.
- Bechtel, D. H. (2015). Tolerance of rising dietary concentrations of esterified propoxylated glycerol (EPG) among human volunteers. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73(1), 413-418.

- Belitz, H. D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2009). Milk and dairy products. *Food chemistry*, 498-545.
- Belyavin, C. G. (2016). Eggs: Use in the Food Industry. In *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 476–479).
- BeMiller, J. N. (2018). Physical modification of starch. In *Starch in food* (pp. 223-253). Woodhead Publishing.
- BeMiller, J. N. (2019). 17-Carbohydrate Nutrition, Dietary Fiber, Bulking Agents, and Fat Mimetics. *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists (Third Edition)*(BeMiller, JN ed.), 323-350.
- BeMiller, J. N. (2019). 9-Guar, locust bean, Tara, and Cassia gums. *Carbohydrate chemistry for food scientists*, 241-252.
- BeMiller, J. N. (2019). Starches: molecular and granular structures and properties. *Carbohydrate chemistry for food scientists*, 3, 159-189.
- BeMiller, J. N. (2019). Monosaccharides. In: *Carbohydrate chemistry for food scientists*. pp 1-23. Elsevier.
- Benjakul, S., & Kittiphattanabawon, P. (2018). Gelatin. In *Encyclopedia of Food Chemistry* (pp. 121-127)
- Benjakul, S., Kittiphattanabawon, P., & Regenstein, J. M. (2012). Fish gelatin. *Food biochemistry and food processing*, 388-405.
- Bergquist, D. H. (2007). Eggs. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Bermudez-Aguirre, D. (2017). Advances in Thermo-and Manothermosonication for microbial inactivation. In *Ultrasound: advances for food processing and preservation* (pp. 15-37). Academic Press.
- Bermudez-Aguirre, D. (2017). Sonochemistry of foods. In *Ultrasound: Advances for Food Processing and Preservation* (pp. 131-143). Academic Press.
- Bermúdez-Aguirre, D., Mobbs, T., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2011). Ultrasound applications in food processing. In *Ultrasound technologies for food and bioprocessing* (pp. 65-105). Springer, New York, NY.
- Bhargava, N., Mor, R. S., Kumar, K., & Sharanagat, V. S. (2021). Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 70, 105293.

- Bhat, M. Y., Dar, T. A., & Singh, L. R. (2016). Casein proteins: structural and functional aspects. *Milk proteins—from structure to biological properties and health aspects. InTech, Rijeka*, 1-17.
- Bis-Souza, C. V., Ozaki, M. M., Vidal, V. A. S., Pollonio, M. A. R., Penna, A. L. B., & Barretto, A. C. S. (2020). Can dietary fiber improve the technological characteristics and sensory acceptance of low-fat Italian type salami? *Journal of food science and technology*, 57(3), 1003-1012.
- Blüher, M. (2019). Obesity: global epidemiology and pathogenesis. *Nature Reviews Endocrinology*, 15(5), 288-298.
- Bogahawaththa, D., Chau, N. H. B., Trivedi, J., Dissanayake, M., & Vasiljevic, T. (2019). Impact of selected process parameters on solubility and heat stability of pea protein isolate. *Lwt*, 102, 246-253.
- Bong, D. D., & Moraru, C. I. (2014). Use of micellar casein concentrate for Greek-style yogurt manufacturing: Effects on processing and product properties. *Journal of Dairy Science*, 97(3), 1259-1269.
- Borges, J. V., de Souza, J. A., Fagnani, R., Costa, G. N., & Dos Santos, J. S. (2019). Reduced-fat Frescal sheep milk cheese with inulin: a first report about technological aspects and sensory evaluation. *Journal of Dairy Research*, 86(3), 368-373.
- Borreani, J., Hernando, I., & Quiles, A. (2020). Cream replacement by hydrocolloid-stabilized emulsions to reduce fat digestion in panna cottas. *LWT*, 119, 108896.
- Borreani, J., Hernando, I., Salvador, A., & Quiles, A. (2017). New hydrocolloid-based emulsions for replacing fat in panna cottas: a structural and sensory study. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(14), 4961-4968.
- Bortnowska, G., Balejko, J., Tokarczyk, G., Romanowska-Osuch, A., & Krzemińska, N. (2014). Effects of pregelatinized waxy maize starch on the physicochemical properties and stability of model low-fat oil-in-water food emulsions. *Food Hydrocolloids*, 36, 229-237.
- Boukid, F., Rosell, C. M., & Castellari, M. (2021). Pea protein ingredients: A mainstream ingredient to (re) formulate innovative foods and beverages. *Trends in Food Science & Technology*.
- Bruno, S. F., Ekorong, F. J. A. A., Karkal, S. S., Cathrine, M. S. B., & Kudre, T. G. (2019). Green and innovative techniques for recovery of valuable compounds

- from seafood by-products and discards: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 85, 10-22.
- Burger, T. G., & Zhang, Y. (2019). Recent progress in the utilization of pea protein as an emulsifier for food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 25-33.
- Campbell, L., Raikos, V., & Euston, S. R. (2003). Modification of functional properties of egg-white proteins. *Food/Nahrung*, 47(6), 369-376.
- Cao, M., & Gao, Q. (2020). Effect of dual modification with ultrasonic and electric field on potato starch. *International journal of biological macromolecules*, 150, 637-643.
- Caro, I., Soto, S., Franco, M. J., Meza-Nieto, M., Alfaro-Rodríguez, R. H., & Mateo, J. (2011). Composition, yield, and functionality of reduced-fat Oaxaca cheese: Effects of using skim milk or a dry milk protein concentrate. *Journal of dairy science*, 94(2), 580-588.
- Carr, A., & Golding, M. (2016). Functional milk proteins production and utilization: Casein-based ingredients. *Advanced dairy chemistry*, 35-66.
- Carrillo-Lopez, L. M., Garcia-Galicia, I. A., Tirado-Gallegos, J. M., Sanchez-Vega, R., Huerta-Jimenez, M., Ashokkumar, M., & Alarcon-Rojo, A. D. (2021). Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105467.
- CARVALHO, G. R. D., Milani, T. M. G., Trinca, N. R. R., Nagai, L. Y., & Barretto, A. C. D. S. (2017). Textured soy protein, collagen and maltodextrin as extenders to improve the physicochemical and sensory properties of beef burger. *Food Science and Technology*, 37, 10-16.
- Castanha, N., Lima, D. C., Junior, M. D. M., Campanella, O. H., & Augusto, P. E. D. (2019). Combining ozone and ultrasound technologies to modify maize starch. *International journal of biological macromolecules*, 139, 63-74.
- Chakka, A. K., Sriraksha, M. S., & Ravishankar, C. N. (2021). Sustainability of emerging green non-thermal technologies in the food industry with food safety perspective: A review. *LWT*, 112140.
- Chandrapala, J. (2015). Low intensity ultrasound applications on food systems. *International Food Research Journal*, 22(3).

- Chang, C., Lahti, T., Tanaka, T., & Nickerson, M. T. (2018). Egg proteins: Fractionation, bioactive peptides and allergenicity. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(15), 5547-5558.
- Chang, C., Li, X., Li, J., Niu, F., Zhang, M., Zhou, B., ... & Yang, Y. (2017). Effect of enzymatic hydrolysis on characteristics and synergistic efficiency of pectin on emulsifying properties of egg white protein. *Food Hydrocolloids*, 65, 87-95.
- Chatli, M. K., Gandhi, N., & Singh, P. (2019). Quality of low-fat mozzarella cheese with different fat replacers. *Acta Alimentaria*, 48(4), 441-448.
- Chavan, P., Sinhmar, A., Nehra, M., Thory, R., Pathera, A. K., Sundarraj, A. A., & Nain, V. (2021). Impact on various properties of native starch after synthesis of starch nanoparticles: A review. *Food Chemistry*, 130416.
- Chavan, R. S., Khedkar, C. D., & Bhatt, S. (2016). *Fat Replacer. Encyclopedia of Food and Health*, 589–595.
- Chávez-Martínez, A., Reyes-Villagrana, R. A., Rentería-Monterrubio, A. L., Sánchez-Vega, R., Tirado-Gallegos, J. M., & Bolivar-Jacobo, N. A. (2020). Low and high-intensity ultrasound in dairy products: applications and effects on physicochemical and microbiological quality. *Foods*, 9(11), 1688.
- Cheftel, J. C., & Dumay, E. (1993). Microcoagulation of proteins for development of “creaminess”. *Food Reviews International*, 9(4), 473-502.
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 34, 540-560.
- Chen, F., Zhang, M., & Yang, C. H. (2020). Application of ultrasound technology in processing of ready-to-eat fresh food: A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 63, 104953.
- Chen, H., Wooten, H., Thompson, L., & Pan, K. (2019). Nanoparticles of casein micelles for encapsulation of food ingredients. *Biopolymer nanostructures for food encapsulation purposes*, 39-68.
- Chen, J., Zhao, J., Li, X., Liu, Q., & Kong, B. (2021). Composite Gel Fabricated with Konjac Glucomannan and Carrageenan Could Be Used as a Cube Fat Substitute to Partially Replace Pork Fat in Harbin Dry Sausages. *Foods*, 10(7), 1460.

- Chen, T. T., Zhang, Z. H., Wang, Z. W., Chen, Z. L., Ma, H., & Yan, J. K. (2021). Effects of ultrasound modification at different frequency modes on physicochemical, structural, functional, and biological properties of citrus pectin. *Food Hydrocolloids*, *113*, 106484.
- Chen, W., Liang, G., Li, X., He, Z., Zeng, M., Gao, D., ... & Chen, J. (2019). Effects of soy proteins and hydrolysates on fat globule coalescence and meltdown properties of ice cream. *Food Hydrocolloids*, *94*, 279-286.
- Chen, W., Ma, X., Wang, W., Lv, R., Guo, M., Ding, T., ... & Liu, D. (2019). Preparation of modified whey protein isolate with gum acacia by ultrasound maillard reaction. *Food Hydrocolloids*, *95*, 298-307.
- Chen, X. W., Fu, S. Y., Hou, J. J., Guo, J., Wang, J. M., & Yang, X. Q. (2016). Zein based oil-in-glycerol emulgels enriched with  $\beta$ -carotene as margarine alternatives. *Food chemistry*, *211*, 836-844.
- Chen, Y., She, Y., Zhang, R., Wang, J., Zhang, X., & Gou, X. (2020). Use of starch-based fat replacers in foods as a strategy to reduce dietary intake of fat and risk of metabolic diseases. *Food science & nutrition*, *8*(1), 16-22.
- Chen, Y., Sheng, L., Gouda, M., & Ma, M. (2019). Impact of ultrasound treatment on the foaming and physicochemical properties of egg white during cold storage. *Lwt*, *113*, 108303.
- Cheng, J., & Cui, L. (2021). Effects of high-intensity ultrasound on the structural, optical, mechanical and physicochemical properties of pea protein isolate-based edible film. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105809.
- Cheng, T., Dong, F., Xiao, L., & Hou, T. (2021). Preparation and evaluation of protein-based fat substitute on the stuffing properties of Chinese Dumpling. *International Journal of Food Science & Technology*.
- Cheung, I., Gomes, F., Ramsden, R., & Roberts, D. G. (2002). Evaluation of fat replacers Avicel™, N Lite S™ and Simplese™ in mayonnaise. *International Journal of Consumer Studies*, *26*(1), 27-33.
- Chihi, M. L., Mession, J. L., Sok, N., & Saurel, R. (2016). Heat-induced soluble protein aggregates from mixed pea globulins and  $\beta$ -lactoglobulin. *Journal of agricultural and food chemistry*, *64*(13), 2780-2791.
- Chin, K. B., Keeton, J. T., Miller, R. K., Longnecker, M. T., & Lamkey, J. W. (2000). Evaluation of konjac blends and soy protein isolate as fat replacements in low-fat bologna. *Journal of Food Science*, *65*(5), 756-763.

- Choe, J., & Kim, H. Y. (2019). Quality characteristics of reduced fat emulsion-type chicken sausages using chicken skin and wheat fiber mixture as fat replacer. *Poultry science*, *98*(6), 2662-2669.
- Christian, B. J., & Bechtel, D. H. (2014). 90-Day dietary toxicity study with esterified propoxylated glycerol (EPG) in rats. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, *70*, S95-S104.
- Chua, J. Y., & Liu, S. Q. (2019). Soy whey: More than just wastewater from tofu and soy protein isolate industry. *Trends in Food Science & Technology*, *91*, 24-32.
- Chung, C., Degner, B., & McClements, D. J. (2014). Development of reduced-calorie foods: microparticulated whey proteins as fat mimetics in semi-solid food emulsions. *Food research international*, *56*, 136-145.
- Chung, C., Smith, G., Degner, B., & McClements, D. J. (2016). Reduced fat food emulsions: physicochemical, sensory, and biological aspects. *Critical reviews in food science and nutrition*, *56*(4), 650-685.
- Chung, H. J., & Min, D. B. (2004). Developments in fat replacers. In *Functional Foods, Cardiovascular Disease and Diabetes* (pp. 351-373). Woodhead Publishing.
- Ciabotti, S., Silva, A. C. B. B., Juhasz, A. C. P., Mendonça, C. D., Tavano, O. L., Mandarino, J. M. G., & ConÇAlves, C. A. A. (2016). Chemical composition, protein profile, and isoflavones content in soybean genotypes with different seed coat colors. *Embrapa Soja-Artigo em periódico indexado (ALICE)*.
- Cierach, M., Modzelewska-Kapituła, M., & Szaciło, K. (2009). The influence of carrageenan on the properties of low-fat frankfurters. *Meat science*, *82*(3), 295-299.
- Colla, K., Costanzo, A., & Gamlath, S. (2018). Fat replacers in baked food products. *Foods*, *7*(12), 192.
- Colomer Sellas, M., de Souza, D. L., Vila-Martí, A., & Torres-Moreno, M. (2021). Effect of pork back-fat reduction and substitution with texturized pea protein on acceptability and sensory characteristics of dry fermented sausages. *CyTA-Journal of Food*, *19*(1), 429-439.
- Corredig, M., Nair, P. K., Li, Y., Eshpari, H., & Zhao, Z. (2019). Invited review: Understanding the behavior of caseins in milk concentrates. *Journal of dairy science*, *102*(6), 4772-4782.

- Corzo-Martínez, M., Villamiel, M., & Moreno, F. J. (2017). Impact of high-intensity ultrasound on protein structure and functionality during food processing. In *Ultrasound in food processing: Recent advances* (pp. 417-436). John Wiley & Sons.
- Hielscher Ultrasonics. (2021). *Hielscher Ultrasonics - Tecnología de ultrasonido de Hielscher*. <https://www.hielscher.com/es/about1.htm>
- Crowley, S. V., Burlot, E., Silva, J. V., McCarthy, N. A., Wijayanti, H. B., Fenelon, M. A., ... & O'Mahony, J. A. (2018). Rehydration behaviour of spray-dried micellar casein concentrates produced using microfiltration of skim milk at cold or warm temperatures. *International Dairy Journal*, *81*, 72-79.
- Csiszar, E., Szabo, Z., Balogh, O., Fekete, E., & Koczka, K. (2021). The role of the particle size reduction and morphological changes of solid substrate in the ultrasound-aided enzymatic hydrolysis of cellulose. *Ultrasonics sonochemistry*, *78*, 105711.
- Cuevas-Acuña, D. A., Arias-Moscoso, J. L., Torres-Arreola, W., Cadena-Cadena, F., Valdez-Melchor, R. G., Chaparro-Hernandez, S., ... & Ruiz-Cruz, S. (2020). High-intensity ultrasound pulses effect on physicochemical and antioxidant properties of tilapia (*Oreochromis niloticus*) skin gelatin. *Applied Sciences*, *10*(3), 1004.
- Cui, R., & Zhu, F. (2020). Effect of ultrasound on structural and physicochemical properties of sweetpotato and wheat flours. *Ultrasonics sonochemistry*, *66*, 105118.
- da Silva Araújo, V. B., de Melo, A. N. F., Costa, A. G., Castro-Gomez, R. H., Madruga, M. S., de Souza, E. L., & Magnani, M. (2014). Followed extraction of  $\beta$ -glucan and mannoprotein from spent brewer's yeast (*Saccharomyces uvarum*) and application of the obtained mannoprotein as a stabilizer in mayonnaise. *Innovative food science & emerging technologies*, *23*, 164-170.
- da Silva Lannes, S. C., & do Amaral, A. A. (2015). Low-Fat Foods. *Food Production and Industry*, 167.
- Das, S. K., Prabhakaran, P., Tanwar, V. K., & Biswas, S. (2015). Effect of some plant starches and carrageenan as fat substitutes in chicken patties. *Journal of animal science*, *93*(7), 3704-3712.
- de Oliveira Faria, M., Cipriano, T. M., da Cruz, A. G., Dos Santos, B. A., Pollonio, M. A. R., & Campagnol, P. C. B. (2015). Properties of bologna-type sausages with pork back-fat replaced with pork skin and amorphous cellulose. *Meat science*, *104*, 44-51.

- de Oliveira, A. P. H., Omura, M. H., Barbosa, É. D. A. A., Bressan, G. C., Vieira, É. N. R., dos Reis Coimbra, J. S., & de Oliveira, E. B. (2020). Combined adjustment of pH and ultrasound treatments modify techno-functionalities of pea protein concentrates. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 603, 125156.
- de Souza Fernandes, D., Leonel, M., Del Bem, M. S., Mischan, M. M., Garcia, É. L., & Dos Santos, T. P. R. (2017). Cassava derivatives in ice cream formulations: effects on physicochemical, physical and sensory properties. *Journal of food science and technology*, 54(6), 1357-1367.
- de Souza Paglarini, C., Martini, S., & Pollonio, M. A. R. (2019). Using emulsion gels made with sonicated soy protein isolate dispersions to replace fat in frankfurters. *LWT*, 99, 453-459.
- de Souza Paglarini, C., Vidal, V. A., Ribeiro, W., Badan Ribeiro, A. P., Bernardinelli, O. D., Herrero, A. M., ... & Rodrigues Pollonio, M. A. (2021). Using inulin-based emulsion gels as fat substitute in salt reduced Bologna sausage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(2), 505-517.
- Deivendran, B., Maran, M., & Subhashini, S. (2021). Ultrasonication of Foods. In *Handbook of Research on Food Processing and Preservation Technologies* (pp. 37-58). Apple Academic Press.
- Diamantino, V. R., Costa, M. S., Taboga, S. R., Vilamaior, P. S., Franco, C. M., & Penna, A. L. B. (2019). Starch as a potential fat replacer for application in cheese: Behaviour of different starches in casein/starch mixtures and in the casein matrix. *International dairy journal*, 89, 129-138.
- Dickinson, E. (2015). Microgels—An alternative colloidal ingredient for stabilization of food emulsions. *Trends in Food Science & Technology*, 43(2), 178-188.
- Dille, M. J., Haug, I. J., & Draget, K. I. (2021). Gelatin and collagen. In *Handbook of Hydrocolloids* (pp. 1073-1097). Woodhead Publishing.
- Ding, L., Xia, M., Zeng, Q., Zhao, Q., Cai, Z., & Zhu, Z. (2021). Foaming properties and aggregation mechanism of egg white protein with different physical treatments. *LWT*, 153, 112505.
- Ding, X., Zeng, N., Zhang, G., Pan, J., Hu, X., & Gong, D. (2019). Influence of transglutaminase-assisted ultrasound treatment on the structure and functional properties of soy protein isolate. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(11), e14203.

- Dissanayake, M., Kelly, A. L., & Vasiljevic, T. (2010). Gelling Properties of Microparticulated Whey Proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *58*(11), 6825–6832.
- Dmour, I., & Taha, M. O. (2018). Natural and semisynthetic polymers in pharmaceutical nanotechnology. *Organic Materials as Smart Nanocarriers for Drug Delivery*, 35-100.
- Do Carmo, M. M. R., Walker, J. C. L., Novello, D., Caselato, V. M., Sgarbieri, V. C., Ouwehand, A. C., ... & Dos Santos, E. F. (2016). Polydextrose: Physiological function, and effects on health. *Nutrients*, *8*(9), 553.
- dos Santos Alves, L. A. A., Lorenzo, J. M., Gonçalves, C. A. A., Dos Santos, B. A., Heck, R. T., Cichoski, A. J., & Campagnol, P. C. B. (2016). Production of healthier bologna type sausages using pork skin and green banana flour as a fat replacers. *Meat Science*, *121*, 73-78.
- Dos Santos, J. M., Ignácio, E. O., Bis-Souza, C. V., & da Silva-Barretto, A. C. (2021). Performance of reduced fat-reduced salt fermented sausage with added microcrystalline cellulose, resistant starch and oat fiber using the simplex design. *Meat Science*, *175*, 108433.
- dos Santos, M., Munekata, P. E., Pateiro, M., Magalhães, G. C., Barretto, A. C. S., Lorenzo, J. M., & Pollonio, M. A. R. (2020). Pork skin-based emulsion gels as animal fat replacers in hot-dog style sausages. *LWT*, *132*, 109845.
- Duque-Estrada, P., Kyriakopoulou, K., de Groot, W., van der Goot, A. J., & Berton-Carabin, C. C. (2020). Oxidative stability of soy proteins: From ground soybeans to structured products. *Food chemistry*, *318*, 126499.
- EFSA Panel on Food Additives and Flavourings (FAF), Younes, M., Aquilina, G., Castle, L., Engel, K. H., Fowler, P., ... & Fernandez, M. J. F. (2021). Re-evaluation of polydextrose (E 1200) as a food additive. *EFSA Journal*, *19*(1), e06363.
- Einhorn-Stoll, U., Archut, A., Eichhorn, M., & Kastner, H. (2021). Pectin-plant protein systems and their application. *Food Hydrocolloids*, 106783.
- Eisinaite, V., Juraite, D., Schroën, K., & Leskauskaite, D. (2017). Food-grade double emulsions as effective fat replacers in meat systems. *Journal of food engineering*, *213*, 54-59.
- Elangkovan, D. R., & Ganapathy, D. (2020). A Comprehensive Review on The Effects of Olestra. *Journal of Contemporary Issues in Business and Government*, *26*(2), 1969-1974.

- El-Kholy, W. M., Aamer, R. A., & Ali, A. N. A. (2020). Utilization of inulin extracted from chicory (*Cichorium intybus* L.) roots to improve the properties of low-fat synbiotic yoghurt. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(1), 59-67.
- Elsanhoty, R. M., & Ramadan, M. F. (2018). Changes in the physicochemical and microbiological properties of probiotic-fermented low-fat yoghurt enriched with barley  $\beta$ -glucan during cold storage. *Mljekarstvo: časopis za unapređenje proizvodnje i prerade mlijeka*, 68(4), 295-309.
- Emadzadeh, B., & Ghorani, B. (2015). Oils and fats in texture modification. In *Modifying food texture* (pp. 99-112). Woodhead Publishing.
- Erinc, H., Mert, B., & Tekin, A. (2018). Different sized wheat bran fibers as fat mimetic in biscuits: its effects on dough rheology and biscuit quality. *Journal of food science and technology*, 55(10), 3960-3970.
- Ertekin, B., & Guzel-Seydim, Z. B. (2010). Effect of fat replacers on kefir quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(4), 543-548.
- Espert, M., Borreani, J., Hernando, I., Quiles, A., Salvador, A., & Sanz, T. (2017). Relationship between cellulose chemical substitution, structure and fat digestion in o/w emulsions. *Food Hydrocolloids*, 69, 76-85.
- Espinosa-Pardo, F. A., Savoie, R., Subra-Paternault, P., & Harscoat-Schiavo, C. (2020). Oil and protein recovery from corn germ: Extraction yield, composition and protein functionality. *Food and Bioprocess Processing*, 120, 131-142.
- Fadimu, G. J., Gill, H., Farahnaky, A., & Truong, T. (2021). Investigating the Impact of Ultrasound Pretreatment on the Physicochemical, Structural, and Antioxidant Properties of Lupin Protein Hydrolysates. *Food and Bioprocess Technology*, 1-16.
- Falsafi, S. R., Maghsoudlou, Y., Rostamabadi, H., Rostamabadi, M. M., Hamed, H., & Hosseini, S. M. H. (2019). Preparation of physically modified oat starch with different sonication treatments. *Food hydrocolloids*, 89, 311-320.
- Fan, R., Zhou, D., & Cao, X. (2020). Evaluation of oat  $\beta$ -glucan-marine collagen peptide mixed gel and its application as the fat replacer in the sausage products. *Plos one*, 15(5), e0233447.
- Fang, T., Shen, X., Hou, J., & Guo, M. (2019). Effects of polymerized whey protein prepared directly from cheese whey as fat replacer on physicochemical, texture, microstructure and sensory properties of low-fat set yogurt. *LWT*, 115, 108268.

- Farahnaky, A., Zendeboodi, F., Azizi, R., Mesbahi, G., & Majzoobi, M. (2017). Solubilization of bovine gelatin using power ultrasound: gelation without heating. *Journal of texture studies*, 48(2), 87-94.
- Farhadi Chitgar, M., Aalami, M., Milani, E., & Maghsoudlo, Y. (2017). Effect of Thermo-sonication on Quality Properties of Barberry (*Berberis vulgaris*) Juice. *Iranian Journal Food Science and Technology Research*, 13(4), 627-636.
- Farkye, N. Y., & Guinee, T. P. (2017). Low-fat and low-sodium cheeses. In *Cheese* (pp. 699-714). Academic Press.
- Fellows, P. J. (2017). Properties of food and principles of processing. *Food Processing Technology; Elsevier: Cambridge, UK*, 3-200.
- Feng, H., Ding, J., & Zhou, B. (2020). Ultrasonic Processes. In *Food Safety Engineering* (pp. 579-605). Springer, Cham.
- Feng, X., Fu, C., & Yang, H. (2017). Gelatin addition improves the nutrient retention, texture and mass transfer of fish balls without altering their nanostructure during boiling. *LWT*, 77, 142-151.
- Feng, X., Sun, Y., Yang, Y., Zhou, X., Cen, K., Yu, C., ... & Tang, X. (2020). Zein nanoparticle stabilized Pickering emulsion enriched with cinnamon oil and its effects on pound cakes. *LWT*, 122, 109025.
- Firouz, M. S., Farahmandi, A., & Hosseinpour, S. (2019). Recent advances in ultrasound application as a novel technique in analysis, processing and quality control of fruits, juices and dairy products industries: A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 57, 73-88.
- Flambeau, M., Redl, A., & Respondek, F. (2017). Proteins From Wheat: Sustainable Production and New Developments in Nutrition-Based and Functional Applications. In *Sustainable protein sources* (pp. 67-78). Academic Press.
- Foley, R. C., Jimenez-Lopez, J. C., Kamphuis, L. G., Hane, J. K., Melser, S., & Singh, K. B. (2015). Analysis of conglutin seed storage proteins across lupin species using transcriptomic, protein and comparative genomic approaches. *BMC plant biology*, 15(1), 1-12.
- Forker, A., Zahn, S., & Rohm, H. (2012). A combination of fat replacers enables the production of fat-reduced shortdough biscuits with high-sensory quality. *Food and Bioprocess Technology*, 5(6), 2497-2505.

- Francolino, S., Locci, F., Ghiglietti, R., Iezzi, R., & Mucchetti, G. (2010). Use of milk protein concentrate to standardize milk composition in Italian citric Mozzarella cheese making. *LWT-Food Science and Technology*, *43*(2), 310-314.
- Fu, X., Belwal, T., Cravotto, G., & Luo, Z. (2020). Sono-physical and sono-chemical effects of ultrasound: Primary applications in extraction and freezing operations and influence on food components. *Ultrasonics sonochemistry*, *60*, 104726.
- Fukushima, D. (2011). Soy proteins. In *Handbook of food proteins* (pp. 210-232). Woodhead Publishing.
- Furlán, L. T. R., & Campderrós, M. E. (2017). The combined effects of Stevia and sucralose as sugar substitute and inulin as fat mimetic on the physicochemical properties of sugar-free reduced-fat dairy dessert. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, *10*, 16-23.
- Furlán, L. T. R., Padilla, A. P., & Campderrós, M. E. (2014). Development of reduced fat minced meats using inulin and bovine plasma proteins as fat replacers. *Meat Science*, *96*(2), 762-768.
- Gagliardi, A., Froiio, F., Salvatici, M. C., Paolino, D., Fresta, M., & Cosco, D. (2020). Characterization and refinement of zein-based gels. *Food Hydrocolloids*, *101*, 105555.
- Galanakis, C. M. (2021). Functionality of food components and emerging technologies. *Foods*, *10*(1), 128.
- Gallego-Juárez, J. A. (2017). Basic principles of ultrasound. *Ultrasound in Food Processing*. Chichester: Wiley Blackwell, 1-26.
- Gallego-Juárez, J. A., & Graff, K. F. (2015). Introduction to power ultrasonics. In *Power ultrasonics* (pp. 1-6). Woodhead Publishing.
- Gamlath, C. J., Leong, T. S., Ashokkumar, M., & Martin, G. J. (2020). Incorporating whey protein aggregates produced with heat and ultrasound treatment into rennet gels and model non-fat cheese systems. *Food Hydrocolloids*, *109*, 106103.
- Gao, H., Ma, L., Li, T., Sun, D., Hou, J., Li, A., & Jiang, Z. (2019). Impact of ultrasonic power on the structure and emulsifying properties of whey protein isolate under various pH conditions. *Process Biochemistry*, *81*, 113-122.
- Gao, Z., Shen, P., Lan, Y., Cui, L., Ohm, J. B., Chen, B., & Rao, J. (2020). Effect of alkaline extraction pH on structure properties, solubility, and beany flavor of yellow pea protein isolate. *Food Research International*, *131*, 109045.

- Garcés-Rimón, M., Sandoval, M., Molina, E., López-Fandiño, R., & Miguel, M. (2016). Egg protein hydrolysates: New culinary textures. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 3, 17-22.
- Gelse, K., Pöschl, E., & Aigner, T. (2003). Collagens—structure, function, and biosynthesis. *Advanced drug delivery reviews*, 55(12), 1531-1546.
- Gerschenson, L. N., Fissore, E. N., Rojas, A. M., Encalada, A. M. I., Zukowski, E. F., & Coelho, R. A. H. (2021). Pectins obtained by ultrasound from agroindustrial by-products. *Food Hydrocolloids*, 106799.
- Gevari, M. T., Abbasiasl, T., Niazi, S., Ghorbani, M., & Koşar, A. (2020). Direct and indirect thermal applications of hydrodynamic and acoustic cavitation: A review. *Applied Thermal Engineering*, 171, 115065.
- Ghadermazi, R., Hamdipour, S., Sadeghi, K., Ghadermazi, R., & Khosrowshahi Asl, A. (2019). Effect of various additives on the properties of the films and coatings derived from hydroxypropyl methylcellulose—A review. *Food science & nutrition*, 7(11), 3363-3377.
- Gharbi, N., & Labbafi, M. (2018). Effect of processing on aggregation mechanism of egg white proteins. *Food chemistry*, 252, 126-133.
- Gharibzahedi, S. M. T., Smith, B., & Guo, Y. (2019). Pectin extraction from common fig skin by different methods: The physicochemical, rheological, functional, and structural evaluations. *International journal of biological macromolecules*, 136, 275-283.
- Ghribi, A. M., Zouari, M., Attia, H., & Besbes, S. (2021). Study of protein/k-carrageenan mixture's effect on low-fat whipping cream formulation. *LWT*, 147, 111647.
- Gibis, M., Schuh, V., & Weiss, J. (2015). Effects of carboxymethyl cellulose (CMC) and microcrystalline cellulose (MCC) as fat replacers on the microstructure and sensory characteristics of fried beef patties. *Food Hydrocolloids*, 45, 236-246.
- Glusac, J., & Fishman, A. (2021). Enzymatic and chemical modification of zein for food application in the memory of Prof. Ashok Patel. *Trends in Food Science & Technology*.
- Glusac, J., Davidesko-Vardi, I., Isaschar-Ovdat, S., Kukavica, B., & Fishman, A. (2018). Gel-like emulsions stabilized by tyrosinase-crosslinked potato and zein proteins. *Food Hydrocolloids*, 82, 53-63.

- Godoi, F. C., Ningtyas, D. W., Geoffroy, Z., & Prakash, S. (2021). Protein-based hydrocolloids: Effect on the particle size distribution, tribo-rheological behaviour and mouthfeel characteristics of low-fat chocolate flavoured milk. *Food Hydrocolloids*, 115, 106628.
- Gómez-Guillén, M. C., Giménez, B., López-Caballero, M. A., & Montero, M. P. (2011). Functional and bioactive properties of collagen and gelatin from alternative sources: A review. *Food hydrocolloids*, 25(8), 1813-1827.
- Goswami, M., Tanuja, V. P., Sharma, H., & Ojha, S. (2019). Potential Use of Fat Replacers for Development of Functional Food of Animal Origin. *Journal of Animal Feed Science and Technology*, 7(2).
- Goulding, D. A., Fox, P. F., & O'Mahony, J. A. (2020). Milk proteins: An overview. *Milk Proteins*, 21-98.
- Grant, C., Cubadda, F., Carcea, M., Pogna, N. E., & Gazza, L. (2012). Vitamins, Minerals, and Nutritional Value of Durum Wheat. In *Durum Wheat* (pp. 125-137). AACC International Press.
- Gu, J., Xin, Z., Meng, X., Sun, S., Qiao, Q., & Deng, H. (2016). A “reduced-pressure distillation” method to prepare zein-based fat analogue for application in mayonnaise formulation. *Journal of Food Engineering*, 182, 1-8.
- Guan, Y. (2021). Liquid Foaming Properties. In *Food Hydrocolloids* (pp. 207-244). Springer, Singapore.
- Guedes-Oliveira, J. M., Costa-Lima, B. R., Oliveira, D., Neto, A., Deliza, R., Conte-Junior, C. A., & Guimarães, C. F. M. (2019). Mixture design approach for the development of reduced fat lamb patties with carboxymethyl cellulose and inulin. *Food science & nutrition*, 7(4), 1328-1336.
- Guimarães, J. T., Balthazar, C. F., Scudino, H., Pimentel, T. C., Esmerino, E. A., Ashokkumar, M., ... & Cruz, A. G. (2019). High-intensity ultrasound: a novel technology for the development of probiotic and prebiotic dairy products. *Ultrasonics sonochemistry*, 57, 12-21.
- Guldiken, B., Gulsunoglu, Z., Bakir, S., Catalkaya, G., Capanoglu, E., & Nickerson, M. (2021). Innovations in functional foods development. In *Food Technology Disruptions* (pp. 73-130). Academic Press.
- Guo, M., & Shen, X. (2019). Modifications of whey protein. *Whey protein production, chemistry, functionality, and applications*, 205-225.

- Guo, M., & Wang, C. (2019). Chemistry of whey proteins. *Whey protein production, chemistry, functionality, and applications*, 39-65.
- Guo, X., Sun, X., Zhang, Y., Wang, R., & Yan, X. (2018). Interactions between soy protein hydrolyzates and wheat proteins in noodle making dough. *Food Chemistry*, 245, 500-507.
- Guo, Y., Zhang, X., Hao, W., Xie, Y., Chen, L., Li, Z., ... & Feng, X. (2018). Nano-bacterial cellulose/soy protein isolate complex gel as fat substitutes in ice cream model. *Carbohydrate polymers*, 198, 620-630.
- Gutiérrez-Luna, K., Astiasarán, I., & Ansorena, D. (2020). Gels as fat replacers in bakery products: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-14.
- Ham, Y. K., Hwang, K. E., Kim, H. W., Song, D. H., Kim, Y. J., Choi, Y. S., & Kim, C. J. (2016). Effects of fat replacement with a mixture of collagen and dietary fibre on small calibre fermented sausages. *International journal of food science & technology*, 51(1), 96-104.
- Ham, Y. K., Kim, Y. J., Yeo, E. J., Lim, Y. B., & Kim, C. J. (2013, August). Effects of Pork Collagen and Wheat Fiber on Quality Properties of Reduced-Fat Sausage as a fat Replacer. In *59th International Congress of Meat Science and Technology*, Izmir, Turkey.
- Hamada, K., Mine, Y., Kuga, I., & Shiki, E. (2016). *U.S. Patent No. 9,414,807*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Hamdy, A. M., Mohran, M. A., Hassan, A. I., & Fahmy, M. A. (2018). Effects of heat, ultrasound and microwave pretreatments on the antigenicity of whey protein concentrate ( $\beta$ -lactoglobulin). *Assiut Journal of Agricultural Sciences*, 49, 75-87.
- Hamdy, S. M., Abdelmontaleb, H. S., Mabrouk, A. M., & Abbas, K. A. (2021). Physicochemical, viability, microstructure, and sensory properties of whole and skimmed buffalo set-yogurts containing different levels of polydextrose during refrigerated storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, e15643.
- Hammam, A. R. A., & Metzger, L. E. (2020). Manufacture of imitation Mozzarella cheese without emulsifying salts using acid curd and micellar casein concentrate.
- Hammam, A. R., Martínez-Monteagudo, S. I., & Metzger, L. E. (2021) Progress in micellar casein concentrate: Production and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*.

- Han, J. A., Chung, H. J., & Lim, S. T. (2019). Physical and emulsifying properties of OSA-corn dextrin with various manufacturing methods. *Food Hydrocolloids*, 89, 563-569.
- Haq, F., Yu, H., Wang, L., Liu, J., Mehmood, S., Haroon, M., ... & Uddin, M. A. (2020). Dual modification of starches by phosphorylation and grafting and their application as adsorbents for the removal of phenol. *Journal of Polymer Research*, 27(10), 1-11.
- Haq, F., Yu, H., Wang, L., Teng, L., Haroon, M., Khan, R. U., ... & Nazir, A. (2019). Advances in chemical modifications of starches and their applications. *Carbohydrate research*, 476, 12-35.
- Harper, W. J., Hewitt, S. A., & Huffman, L. M. (2020). *Model food systems and protein functionality. Milk Proteins*, 573–598.
- Harris, P., Normand, V., & Norton, I. T. (2003). GELATIN. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, 2865–2871.
- Hartono, M. A. (2019). *The effects of gelatin concentration as protein-based fat mimetics in low fat soft ice cream of red guava (Psidium guajava L.)* (Doctoral dissertation, Unika Soegijapranata Semarang).
- Hashim, P., Ridzwan, M. M., Bakar, J., & Hashim, M. D. (2015). Collagen in food and beverage industries. *International Food Research Journal*, 22(1), 1.
- Haug, I. J., & Draget, K. I. (2011). Gelatin. In *Handbook of food proteins* (pp. 92-115). Woodhead Publishing.
- He, L., Gao, Y., Wang, X., Han, L., Yu, Q., Shi, H., & Song, R. (2021). Ultrasonication promotes extraction of antioxidant peptides from oxhide gelatin by modifying collagen molecule structure. *Ultrasonics Sonochemistry*, 78, 105738.
- Hertzler, S. R., Lieblein-Boff, J. C., Weiler, M., & Allgeier, C. (2020). Plant proteins: Assessing their nutritional quality and effects on health and physical function. *Nutrients*, 12(12), 3704.
- Hjelm, L., Mielby, L. A., Gregersen, S., Eggers, N., & Bertram, H. C. (2019). Partial substitution of fat with rye bran fibre in Frankfurter sausages—Bridging technological and sensory attributes through inclusion of collagenous protein. *Lwt*, 101, 607-617.
- Hielscher Ultrasonics. (2021). *Hielscher Ultrasonics - Tecnología de ultrasonido de Hielscher*. <https://www.hielscher.com/es/about1.htm>

- Horne, D. S. (2020). Casein micelle structure and stability. In *Milk proteins* (pp. 213-250). Academic Press.
- Hossain, M. K., Keidel, J., Hensel, O., & Diakité, M. (2020). The impact of extruded microparticulated whey proteins in reduced-fat, plain-type stirred yogurt: Characterization of physicochemical and sensory properties. *LWT*, *134*, 109976
- Hosseini Sajedi, A., Azarikia, M., Borhani, B., & Gholami, R. (2021). Maltodextrin As Fat Replacer in Food Products: A Review. *Alborz University Medical Journal*, *10*(2), 7-13.
- Hosseini Shekarabi, S. P., Rostami, N., Shaviklo, A. R., & Mhd Sarbon, N. (2021). Application of an optimum level of acidic extracted grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) gelatin as a fat replacer in low-fat milk cream development. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, *20*(5), 1277-1290.
- Hou, F., Fan, L., Ma, X., Wang, D., Wang, W., Ding, T., ... & Liu, D. (2018). Degradation of carboxymethylcellulose using ultrasound and  $\beta$ -glucanase: Pathways, kinetics and hydrolysates' properties. *Carbohydrate polymers*, *201*, 514-521.
- Huang, L., Abdel-Hamid, M., Romeih, E., Zeng, Q. K., Yang, P., Walker, G., & Li, L. (2020). Textural and organoleptic properties of fat-free buffalo yogurt as affected by polydextrose. *International Journal of Food Properties*, *23*(1), 1-8.
- Huang, T., Tu, Z. C., Shangguan, X., Sha, X., Wang, H., Zhang, L., & Bansal, N. (2019). Fish gelatin modifications: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, *86*, 260-269.
- Huang, T., Tu, Z. C., Xinchun-Shangguan, Wang, H., Zhang, L., & Sha, X. M. (2017). Rheological and structural properties of fish scales gelatin: Effects of conventional and ultrasound-assisted extraction. *International journal of food properties*, *20*(sup2), 1210-1220.
- Huang, T., Tu, Z., Shangguan, X., Wang, H., Zhang, L., & Bansal, N. (2021). Characteristics of fish gelatin-anionic polysaccharide complexes and their applications in yoghurt: Rheology and tribology. *Food Chemistry*, *343*, 128413.
- Huppertz, T., Fox, P. F., & Kelly, A. L. (2018). The caseins: Structure, stability, and functionality. In *Proteins in food processing* (pp. 49-92). Woodhead Publishing.
- Husak, R., Prabhu, G., Deyarmond, V., & Spontelli, C. (2018). Use of Methylcellulose as a Replacer of Meat in Beef Patties. *Meat and Muscle Biology*, *1*(2).

- Ibarra, V. G., Sendón, R., & de Quirós, A. R. B. (2016). Antimicrobial food packaging based on biodegradable materials. In *Antimicrobial food packaging* (pp. 363-384). Academic Press.
- Ibrahim, F. N., Ismail-Fitry, M. R., Yusoff, M. M., & Shukri, R. (2018). Effects of Fish Collagen Hydrolysate (FCH) as fat replacer in the production of buffalo patties. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 11(1), 108-117.
- Iftikhar, S. A., & Dutta, H. (2020). Use of raw and physically modified rice starches as fat replacer in whipping cream. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 8(1), 122-130.
- Illippangama, A. U., Jayasena, D. D., Jo, C., & Mudannayake, D. (2021). Inulin as a Functional Ingredient and their Applications in Meat Products. *Carbohydrate Polymers*, 118706.
- Iparraguirre, R. M. P., Porrás, M. M., De La Cruz, A. H., & Bonilla, M. L. D. (2020). Prevalence of overweight and obesity in Young Peruvian students at National University of Center of Peru-Region Junin-Huancayo. *Obesity Medicine*, 19, 100242.
- Ipsen, R. (2017). Microparticulated whey proteins for improving dairy product texture. *International Dairy Journal*, 67, 73-79.
- İşçimen, E. M., & Hayta, M. (2021). Effect of Ultrasound Pretreatment on the Functional and Antioxidant Properties of Fermented and Germinated Lupin Protein Isolates Grafted with Glucose. *Journal of the Science of Food and Agriculture*.
- Ishwarya S, P., & Nisha, P. (2021). Advances and prospects in the food applications of pectin hydrogels. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-25.
- Islam, S., Yu, Z., She, M., Zhao, Y., & Ma, W. (2019). Wheat gluten protein and its impacts on wheat processing quality. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 6(3), 279-287.
- Jamalabadi, M., Saremnezhad, S., Bahrami, A., & Jafari, S. M. (2019). The influence of bath and probe sonication on the physicochemical and microstructural properties of wheat starch. *Food science & nutrition*, 7(7), 2427-2435.
- Jambrak, A. R. (2017). Physical properties of sonicated products: a new era for novel ingredients. In *Ultrasound: Advances for Food Processing and Preservation* (pp. 237-265). Academic Press.

- Jardines, A. P., Arjona-Román, J. L., Severiano-Pérez, P., Totosaus-Sánchez, A., Fiszman, S., & Escalona-Buendía, H. B. (2020). Agave fructans as fat and sugar replacers in ice cream: Sensory, thermal and texture properties. *Food Hydrocolloids*, *108*, 106032.
- Jiang, S., Ding, J., Andrade, J., Rababah, T. M., Almajwal, A., Abulmeaty, M. M., & Feng, H. (2017). Modifying the physicochemical properties of pea protein by pH-shifting and ultrasound combined treatments. *Ultrasonics sonochemistry*, *38*, 835-842.
- Jiang, Z., Gao, Y., Li, J., Wang, K., Ma, C., Sun, D., ... & Hou, J. (2021). Consecutive pH-shift and ultrasound treatment modify the physicochemical properties of whey protein isolate. *International Dairy Journal*, 105211.
- Jiang, Z., Yao, K., Yuan, X., Mu, Z., Gao, Z., Hou, J., & Jiang, L. (2018). Effects of ultrasound treatment on physico-chemical, functional properties and antioxidant activity of whey protein isolate in the presence of calcium lactate. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *98*(4), 1522-1529.
- Jin, J., Lin, H., Yagoub, A. E. A., Xiong, S., Xu, L., & Udenigwe, C. C. (2020). Effects of high power ultrasound on the enzymolysis and structures of sweet potato starch. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *100*(8), 3498-3506.
- Johnson, S. K., Clements, J., Villarino, C. B. J., & Coorey, R. (2017). Lupins: Their unique nutritional and health-promoting attributes. In *Gluten-free ancient grains* (pp. 179-221). Woodhead Publishing.
- Jones, J. M., & Jonnalagadda, S. S. (2006). The use of fat replacers for weight loss and control. In *Improving the fat content of foods* (pp. 380-390). Woodhead Publishing.
- Jun, S., Yaoyao, M., Hui, J., Obadi, M., Zhongwei, C., & Bin, X. (2020). Effects of single-and dual-frequency ultrasound on the functionality of egg white protein. *Journal of Food Engineering*, *277*, 109902.
- Jung, D. C., & Song, S. H. (2019). Fat replacers among low calorie food ingredients. *Food Science and Industry*, *52*(4), 387-400.
- Kale, R. V., Sontakke, M. D., & Raut GSand Chavan, V. R. (2020). Use of enzyme modified sweet potato starch in formulation of ice cream. *IJCS*, *8*(4), 3002-3008.
- Kamani, M. H., Meera, M. S., Bhaskar, N., & Modi, V. K. (2019). Partial and total replacement of meat by plant-based proteins in chicken sausage: Evaluation of mechanical, physico-chemical and sensory characteristics. *Journal of food science and technology*, *56*(5), 2660-2669.

- Kang, D., Zhang, W., Lorenzo, J. M., & Chen, X. (2021). Structural and functional modification of food proteins by high power ultrasound and its application in meat processing. *Critical reviews in food science and nutrition*, 61(11), 1914-1933.
- Karim, A. A., & Bhat, R. (2008). Gelatin alternatives for the food industry: recent developments, challenges and prospects. *Trends in food science & technology*, 19(12), 644-656.
- Karimi, R., Azizi, M. H., Ghasemlou, M., & Vaziri, M. (2015). Application of inulin in cheese as prebiotic, fat replacer and texturizer: A review. *Carbohydrate polymers*, 119, 85-100.
- Kasaai, M. R. (2018). Zein and zein-based nano-materials for food and nutrition applications: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 79, 184-197.
- Kaur, H., & Gill, B. S. (2019). Effect of high-intensity ultrasound treatment on nutritional, rheological and structural properties of starches obtained from different cereals. *International journal of biological macromolecules*, 126, 367-375.
- Keenan, T. R. (2012). 10.13-Gelatin. *Polymer Science: A Comprehensive Reference*. Amsterdam: Elsevier, 237-47.
- Kelly, P. (2019). Manufacture of whey protein products: concentrates, isolate, whey protein fractions and microparticulated. In *Whey proteins* (pp. 97-122). Academic Press.
- Kentish, S. E. (2017). Engineering principles of ultrasound technology. In *Ultrasound: Advances for Food Processing and Preservation* (pp. 1-13). Academic Press.
- Kentish, S., & Ashokkumar, M. (2011). The physical and chemical effects of ultrasound. In *Ultrasound technologies for food and bioprocessing* (pp. 1-12). Springer, New York, NY.
- Kentish, S., & Feng, H. (2014). Applications of power ultrasound in food processing. *Annual review of food science and technology*, 5, 263-284.
- Kerry, J. F., & Kerry, J. P. (2006). Producing low-fat meat products. In *Improving the fat content of foods* (pp. 336-379). Woodhead Publishing.
- Kew, B., Holmes, M., Stieger, M., & Sarkar, A. (2020). Review on fat replacement using protein-based microparticulated powders or microgels: A textural perspective. *Trends in food science & technology*.

- Khan, S. A., Dar, A. H., Bhat, S. A., Fayaz, J., Makroo, H. A., & Dwivedi, M. (2020). High intensity ultrasound processing in liquid foods. *Food Reviews International*, 1-26.
- Khan, S., Rustagi, S., Choudhary, S., Pandey, A., Khan, M. K., Kumari, A., & Singh, A. (2018). Sucralose and maltodextrin-An alternative to low fat sugar free ice-cream. *Bioscience biotechnology research communications*, 11(1), 136-143.
- Khanal, B. K. S., & Bansal, N. (2020). Dairy Fat Replacement in Low-Fat Cheese (LFC): A Review of Successful Technological Interventions. *Dairy Fat Products and Functionality*, 549-581.
- Khatkar, A. B., Kaur, A., & Khatkar, S. K. (2020). Restructuring of soy protein employing ultrasound: Effect on hydration, gelation, thermal, in-vitro protein digestibility and structural attributes. *LWT*, 132, 109781.
- Khatkar, A. B., Kaur, A., Khatkar, S. K., & Mehta, N. (2018). Characterization of heat-stable whey protein: Impact of ultrasound on rheological, thermal, structural and morphological properties. *Ultrasonics sonochemistry*, 49, 333-342.
- Khorshidi, A. S., Ames, N., Cuthbert, R., Sopiwnyk, E., & Thandapilly, S. J. (2019). Application of low-intensity ultrasound as a rapid, cost-effective tool to wheat screening: Discrimination of Canadian varieties at 10 MHz. *Journal of cereal science*, 88, 9-15.
- Khorshidi, A. S., Thandapilly, S. J., & Ames, N. (2018). Application of low-intensity ultrasound as a rapid, cost-effective tool to wheat screening: A systematic frequency selection. *Journal of Cereal Science*, 82, 190-197.
- Khubber, S., Chaturvedi, K., Thakur, N., Sharma, N., & Yadav, S. K. (2021). Low-methoxyl pectin stabilizes low-fat set yoghurt and improves their physicochemical properties, rheology, microstructure and sensory liking. *Food Hydrocolloids*, 111, 106240.
- Khurshida, S., Das, M. J., Deka, S. C., & Sit, N. (2021). Effect of dual modification sequence on physicochemical, pasting, rheological and digestibility properties of cassava starch modified by acetic acid and ultrasound. *International Journal of Biological Macromolecules*, 188, 649-656.
- Kim, D. A., Cornec, M., & Narsimhan, G. (2005). Effect of thermal treatment on interfacial properties of  $\beta$ -lactoglobulin. *Journal of Colloid and Interface Science*, 285(1), 100-109.

- Kim, T. K., Ham, Y. K., Shin, D. M., Kim, H. W., Jang, H. W., Kim, Y. B., & Choi, Y. S. (2020). Extraction of crude gelatin from duck skin: effects of heating methods on gelatin yield. *Poultry science*, 99(1), 590-596.
- Kim, T. K., Hwang, K. E., Sung, J. M., Park, J. D., Kim, M. H., Jeon, K. H., ... & Choi, Y. S. (2018). Replacement of pork back fat with pre-emulsion of wheat (*Triticum aestivum* L.) sprout and collagen and its optimization for reduced-fat patties. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(4), e13576.
- Kim, W., Wang, Y., & Selomulya, C. (2020). Dairy and plant proteins as natural food emulsifiers. *Trends in Food Science & Technology*.
- Kim, Y. J., Jeong, T. J., Ham, Y. K., Song, D. H., & Kim, C. J. (2015). Effects of colloidal microcrystalline cellulose and collagen powder mixture on low fat sausage as fat replacer.
- Kiosseoglou, V., & Paraskevopoulou, A. (2014). Eggs. *Bakery products science and technology*, 243-258.
- Klaochanpong, N., Pancha-arnon, S., Uttapap, D., Puttanlek, C., & Rungsardthong, V. (2017). Octenyl succinylation of granular and debranched waxy starches and their application in low-fat salad dressing. *Food Hydrocolloids*, 66, 296-306.
- Klupšaitė, D., & Juodeikienė, G. (2015). Legume: Composition, protein extraction and functional properties. A review. *Chemical Technology*, 66(1), 5-12.
- Kobayashi, H., Sasahara, R., Yoda, S., & Kotake-Nara, E. (2017). Egg white hydrolysate inhibits oxidation in mayonnaise and a model system. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 81(6), 1206-1215.
- Kołodowska, A., & Sikorski, Z. E. (2010). Lipids and Food Quality. In *Chemical, Biological, and Functional Aspects of Food Lipids 2e*. Sikorski, Z. Z., & Kołodowska, A. (Eds.). p. 71.
- Krishnakumar, T., & Sajeev, M. S. (2018). Effect of ultrasound treatment on physicochemical and functional properties of cassava starch. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 7(10), 3122-3135.
- Kumar, K., Srivastav, S., & Sharanagat, V. S. (2021). Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105325.
- Kumar, M., Tomar, M., Potkule, J., Punia, S., Dhakane, J., Singh, S., ... & Kennedy, J. F. (2021). Functional characterization of plant-based protein to determine its quality for food applications. *Food Hydrocolloids*, 106986.

- Kumar, M., Tomar, M., Potkule, J., Verma, R., Punia, S., Mahapatra, A., ... & Kennedy, J. F. (2021b). Advances in the plant protein extraction: Mechanism and recommendations. *Food Hydrocolloids*, 106595.
- Kumar, R., Chauhan, S. K., Shinde, G., Subramanian, V., & Nadanasabapathi, S. (2018). Whey Proteins: A potential ingredient for food industry-A review. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 37(4), 283-290.
- Kumar, Y. (2021). Development of low-fat/reduced-fat processed meat products using fat replacers and analogues. *Food Reviews International*, 37(3), 296-312.
- Kwon, H. C., Shin, D. M., Yune, J. H., Jeong, C. H., & Han, S. G. (2021). Evaluation of gels formulated with whey proteins and sodium dodecyl sulfate as a fat replacer in low-fat sausage. *Food Chemistry*, 337, 127682.
- Lafarga, T. (2018). Potential applications of plant-derived proteins in the food industry. *Novel Proteins for Food. Pharmaceuticals and Agriculture*, 117-137.
- Lafiandra, D., Masci, S., Sissons, M., Dornez, E., Delcour, J., Courtin, C., & Caboni, M. F. (2012). Kernel components of technological value. In: *Durum wheat chemistry and technology*, 85-106.
- Lafta, S. S., Luma Khairy, H., & Hakim, I. M. (2019). Effect of fortified low fat-soft cheese with arabic gum on physicochemical and rheological properties. *Plant Archives*, 19(2), 616-621.
- Lagrange, V., Whitsett, D., & Burris, C. (2015). *Global Market for Dairy Proteins. Journal of Food Science*, 80(S1), A16–A22.
- Laguna, L., Primo-Martín, C., Varela, P., Salvador, A., & Sanz, T. (2014). HPMC and inulin as fat replacers in biscuits: Sensory and instrumental evaluation. *LWT-Food science and technology*, 56(2), 494-501.
- Lai, G., Pes, M., Addis, M., & Pirisi, A. (2020). A Cluster Project Approach to Develop New Functional Dairy Products from Sheep and Goat Milk. *Dairy*, 1(2), 154-168.
- Lam, A. C. Y., Can Karaca, A., Tyler, R. T., & Nickerson, M. T. (2018). Pea protein isolates: Structure, extraction, and functionality. *Food Reviews International*, 34(2), 126-147.
- Lara-Castellanos, M. J., Azuara, E., Jimenez-Fernandez, V. M., Luna-Solano, G., & Jimenez, M. (2021). Effect of casein replacement by modified casein on physicochemical, textural, sensorial properties and microbiological stability of fresh cheese. *International Dairy Journal*, 112, 104864.

- Larkins, B. A. (2019). Proteins of the Kernel. In *Corn* (pp. 319-336). AACC International Press.
- Larkins, B. A., Wu, Y., Song, R., & Messing, J. (2017). 14 Maize Seed Storage Proteins. *Maize kernel development*, 175.
- Lawton, J. W. (2002). Zein: A history of processing and use. *Cereal Chemistry*, 79(1), 1-18.
- Lazaridou, A., Serafeimidou, A., Biliaderis, C. G., Moschakis, T., & Tzanetakis, N. (2014). Structure development and acidification kinetics in fermented milk containing oat  $\beta$ -glucan, a yogurt culture and a probiotic strain. *Food Hydrocolloids*, 39, 204-214.
- Lechevalier, V., Nau, F., & Jeantet, R. (2013). Powdered egg. In *Handbook of food powders* (pp. 484-512). Woodhead Publishing.
- Lee, C. H., & Chin, K. B. (2016). Effects of pork gelatin levels on the physicochemical and textural properties of model sausages at different fat levels. *LWT*, 74, 325-330.
- Lee, C. H., & Chin, K. B. (2017). Development of low-fat sausages using basil seed gum (*Ocimum bacilicum* L.) and gelatin as a fat replacer. *International Journal of Food Science & Technology*, 52(3), 733-740.
- Lee, S. (2018). Utilization of foam structured hydroxypropyl methylcellulose for oleogels and their application as a solid fat replacer in muffins. *Food Hydrocolloids*, 77, 796-802.
- Lee, S. M., Cho, A. R., Yoo, S. H., & Kim, Y. S. (2018). Effects of maltodextrins with different dextrose-equivalent values. *Flavour and Fragrance Journal*, 33(2), 153-159.
- Leman, J. (2007). Enzymatically modified whey protein and other protein-based fat replacers. In *Novel enzyme technology for food applications* (pp. 140-159). Woodhead Publishing.
- Leonard, W., Hutchings, S. C., Warner, R. D., & Fang, Z. (2019). Effects of incorporating roasted lupin (*Lupinus angustifolius*) flour on the physicochemical and sensory attributes of beef sausage. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(5), 1849-1857.

- Leong, T. S., Walter, V., Gamlath, C. J., Yang, M., Martin, G. J., & Ashokkumar, M. (2018). Functionalised dairy streams: Tailoring protein functionality using sonication and heating. *Ultrasonics sonochemistry*, *48*, 499-508.
- Leong, T., Ashokkumar, M., & Kentish, S. (2016). The growth of bubbles in an acoustic field by rectified diffusion. *Handbook of ultrasonics and sonochemistry*, *10*, 978-981.
- León-López, A., Morales-Peñalosa, A., Martínez-Juárez, V. M., Vargas-Torres, A., Zeugolis, D. I., & Aguirre-Álvarez, G. (2019). Hydrolyzed collagen—sources and applications. *Molecules*, *24*(22), 4031.
- Li, M., Li, J., & Zhu, C. (2018). Effect of ultrasound pretreatment on enzymolysis and physicochemical properties of corn starch. *International journal of biological macromolecules*, *111*, 848-856.
- Li, S., Li, Q., Zhu, F., Song, H., Wang, C., & Guan, X. (2022). Effect of vacuum combined ultrasound treatment on the fine structure and physicochemical properties of rice starch. *Food Hydrocolloids*, *124*, 107198.
- Li, W., Gamlath, C. J., Pathak, R., Martin, G. J., & Ashokkumar, M. (2019). Ultrasound—the physical and chemical effects integral to food processing.
- Li, X., Guo, T., Yu, Y., & Zhang, Y. (2019). Effects of ultrasound treatment on properties of gelatin from porcine skin. *Food and Fermentation Industries*, *45*(6), 153-158.
- Li, Y., Cheng, Y., Zhang, Z., Wang, Y., Mintah, B. K., Dabbour, M., ... & Ma, H. (2020). Modification of rapeseed protein by ultrasound-assisted pH shift treatment: Ultrasonic mode and frequency screening, changes in protein solubility and structural characteristics. *Ultrasonics Sonochemistry*, *69*, 105240.
- Li, Y., Xu, G., Li, W., Lv, L., & Zhang, Q. (2021). The Role of Ultrasound in the Preparation of Zein Nanoparticles/Flaxseed Gum Complexes for the Stabilization of Pickering Emulsion. *Foods*, *10*(9), 1990.
- Li, Y., You, M., Liu, H., & Liu, X. (2021). Comparison of distribution and physicochemical properties of  $\beta$ -glucan extracted from different fractions of highland barley grains. *International Journal of Biological Macromolecules*, *189*, 91-99.
- Liang, Q., Ren, X., Qu, W., Zhang, X., Cheng, Y., & Ma, H. (2021). The impact of ultrasound duration on the structure of  $\beta$ -lactoglobulin. *Journal of Food Engineering*, *292*, 110365.

- Li-Chan, E. C. Y., & Lacroix, I. M. E. (2018). Properties of proteins in food systems: an introduction. In *Proteins in food processing* (pp. 1-25). Woodhead Publishing.
- Lili, L., Huan, W., Guangyue, R., Xu, D., Dan, L., & Guangjun, Y. (2015). Effects of freeze-drying and spray drying processes on functional properties of phosphorylation of egg white protein. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *8*(4), 116-123.
- Lin, D., Lu, W., Kelly, A. L., Zhang, L., Zheng, B., & Miao, S. (2017). Interactions of vegetable proteins with other polymers: Structure-function relationships and applications in the food industry. *Trends in food science & technology*, *68*, 130-144.
- Lin, D., Zhang, Q., Xiao, L., Huang, Y., Yang, Z., Wu, Z., ... & Li, S. (2021). Effects of ultrasound on functional properties, structure and glycation properties of proteins: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *61*(15), 2471-2481.
- Liu, D., Ma, X., Wang, W., Zou, M., Wang, D., & Ling, J. (2019). Research Progress on Power Ultrasound Technology. In *Advances in Food Processing Technology* (pp. 149-187). Springer, Singapore.
- Liu, L., Hao, W., Dai, X., Zhu, Y., Chen, K., & Yang, X. (2020). Enzymolysis kinetics and structural-functional properties of high-intensity ultrasound-assisted alkali pretreatment ovalbumin. *International Journal of Food Properties*, *23*(1), 80-94
- Liu, R., Tian, Z., Song, Y., Wu, T., Sui, W., & Zhang, M. (2018). Optimization of the production of microparticulated egg white proteins as fat mimetic in salad dressings using uniform design. *Food Science and Technology Research*, *24*(5), 817-827.
- Liu, R., Wang, L., Liu, Y., Wu, T., & Zhang, M. (2018). Fabricating soy protein hydrolysate/xanthan gum as fat replacer in ice cream by combined enzymatic and heat-shearing treatment. *Food Hydrocolloids*, *81*, 39-47.
- Liu, X., Guo, J., Wan, Z. L., Liu, Y. Y., Ruan, Q. J., & Yang, X. Q. (2018). Wheat gluten-stabilized high internal phase emulsions as mayonnaise replacers. *Food Hydrocolloids*, *77*, 168-175.
- Liu, Y., Ahmed, S., Sameen, D. E., Wang, Y., Lu, R., Dai, J., ... & Qin, W. (2021). A review of cellulose and its derivatives in biopolymer-based for food packaging application. *Trends in Food Science & Technology*.

- Liu, Y., Liang, Q., Liu, X., Raza, H., Ma, H., & Ren, X. (2022). Treatment with ultrasound improves the encapsulation efficiency of resveratrol in zein-gum Arabic complex coacervates. *LWT*, *153*, 112331.
- Lo, B., Kasapis, S., & Farahnaky, A. (2021). Lupin protein: Isolation and techno-functional properties, a review. *Food Hydrocolloids*, *112*, 106318.
- Lobato-Calleros, C., Ramírez-Santiago, C., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramirez, J. (2014). Impact of native and chemically modified starches addition as fat replacers in the viscoelasticity of reduced-fat stirred yogurt. *Journal of Food Engineering*, *131*, 110-115.
- López-Martínez, M. I., Moreno-Fernández, S., & Miguel, M. (2021). Development of functional ice cream with egg white hydrolysates. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, *25*, 100334.
- Lou, X., Luo, D., Yue, C., Zhang, T., Li, P., Xu, Y., ... & Xiang, J. (2021). Effect of ultrasound treatment on the physicochemical and structural properties of long-chain inulin. *LWT*, 112578.
- Loveday, S. M. (2019). Food proteins: technological, nutritional, and sustainability attributes of traditional and emerging proteins. *Annual review of food science and technology*, *10*, 311-339.
- Lu, Y., McMahon, D. J., & Vollmer, A. H. (2016). Investigating cold gelation properties of recombined highly concentrated micellar casein concentrate and cream for use in cheese making. *Journal of dairy science*, *99*(7), 5132-5143.
- Lu, Z. X., He, J. F., Zhang, Y. C., & Bing, D. J. (2020). Composition, physicochemical properties of pea protein and its application in functional foods. *Critical reviews in food science and nutrition*, *60*(15), 2593-2605.
- Lua, H. Y., Naim, M. N., P. Mohammed, M. A., Hamidon, F., & Abu Bakar, N. F. (2020). Effects of ultrasonicated methylcellulose coating on French fries during deep frying process. *Journal of Food Process Engineering*, *43*(2), e13332.
- Lucca, P. A., & Tepper, B. J. (1994). Fat replacers and the functionality of fat in foods. *Trends in Food Science & Technology*, *5*(1), 12-19.
- Luo, Y., & Hu, Q. (2017). Food-derived biopolymers for nutrient delivery. In *Nutrient Delivery* (pp. 251-291). Academic Press.
- Ma, X., Hou, F., Zhao, H., Wang, D., Chen, W., Miao, S., & Liu, D. (2020). Conjugation of soy protein isolate (SPI) with pectin by ultrasound treatment. *Food Hydrocolloids*, *108*, 106056

- Ma, Z., & Boye, J. I. (2013). Advances in the design and production of reduced-fat and reduced-cholesterol salad dressing and mayonnaise: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(3), 648-670.
- Maghsoudlou, Y., Falsafi, S. R., & Rostamabadi, H. (2020). Effect of sonication on physical, chemical and functional properties of oat starch. *Journal of Food Processing and Preservation*, 12(1), 145-160.
- Mahdian, E., & Karazhian, R. (2013). Effects of fat replacers and stabilizers on rheological, physicochemical and sensory properties of reduced-fat ice cream. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 15(6), 1163-1174.
- Mahungu, S. M., Hansen, S. L., & Artz, W. E. (1999). Identification and quantitation of volatile compounds in two heated model compounds, trilinolein and linoleic acid esterified propoxylated glycerol. *Journal of agricultural and food chemistry*, 47(2), 690-694.
- Majid, I., Nayik, G. A., & Nanda, V. (2015). Ultrasonication and food technology: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 1(1), 1071022.
- Maneerat, N., Tangsuphoom, N., & Nitithamyong, A. (2017). Effect of extraction condition on properties of pectin from banana peels and its function as fat replacer in salad cream. *Journal of food science and technology*, 54(2), 386-397.
- Maniglia, B. C., Castanha, N., Rojas, M. L., & Augusto, P. E. (2021). Emerging technologies to enhance starch performance. *Current Opinion in Food Science*, 37, 26-36.
- Marangoni, A. G., Acevedo, N., Maleky, F., Co, E., Peyronel, F., Mazzanti, G., ... Pink, D. (2012). *Structure and functionality of edible fats*. *Soft Matter*, 8(5), 1275–1300.
- Marangoni, A. G., Van Duynhoven, J. P., Acevedo, N. C., Nicholson, R. A., & Patel, A. R. (2020). Advances in our understanding of the structure and functionality of edible fats and fat mimetics. *Soft Matter*, 16(2), 289-306.
- Marcus, J. B. (2013). Chapter 5-Protein Basics: Animal and Vegetable Proteins in Food and Health: Healthy Protein Choices, Roles and Applications in Nutrition. *Food Science and the Culinary Arts. Culinary Nutrition The Science and Practice of Healthy Cooking*, 189-230.

- Masina, N., Choonara, Y. E., Kumar, P., du Toit, L. C., Govender, M., Indermun, S., & Pillay, V. (2017). A review of the chemical modification techniques of starch. *Carbohydrate polymers*, *157*, 1226-1236.
- Mattice, K. D., & Marangoni, A. G. (2019). Fat crystallization and structure in bakery, meat, and cheese systems. In *Structure-function analysis of edible fats* (pp. 287-311). AOCS Press.
- Mattice, K. D., & Marangoni, A. G. (2020). Physical properties of plant-based cheese products produced with zein. *Food Hydrocolloids*, *105*, 105746.
- McArdle, R., & Hamill, R. (2011). Utilisation of hydrocolloids in processed meat systems. In *Processed meats* (pp. 243-269). Woodhead Publishing.
- McCarthy, N. A., Kennedy, D., Hogan, S. A., Kelly, P. M., Thapa, K., Murphy, K. M., & Fenelon, M. A. (2016). Emulsification properties of pea protein isolate using homogenization, microfluidization and ultrasonication. *Food Research International*, *89*, 415-421.
- McSweeney, D. J., Maidannyk, V., Montgomery, S., O'Mahony, J. A., & McCarthy, N. A. (2020). The influence of composition and manufacturing approach on the physical and rehydration properties of milk protein concentrate powders. *Foods*, *9*(2), 236.
- Meena, G. S., Singh, A. K., Panjagari, N. R., & Arora, S. (2017). Milk protein concentrates: opportunities and challenges. *Journal of food science and technology*, *54*(10), 3010-3024.
- Mehla, R., Kumari, A., Dhankhar, J., Bumbadiya, M., & Tyagi, A. (2020). Whey: Importance and Techno-functional Applications. In *Dairy Processing: Advanced Research to Applications* (pp. 161-179). Springer, Singapore.
- Meirelles, A. A. D., Costa, A. L. R., & Cunha, R. L. (2020). The stabilizing effect of cellulose crystals in O/W emulsions obtained by ultrasound process. *Food research international*, *128*, 108746.
- Mejía, S. M. V., de Francisco, A., & Bohrer, B. (2020). A comprehensive review on cereal  $\beta$ -glucan: Extraction, characterization, causes of degradation, and food application. *Critical reviews in food science and nutrition*, *60*(21), 3693-3704.
- Meldrum, D. R., Morris, M. A., & Gambone, J. C. (2017). *Obesity pandemic: causes, consequences, and solutions but do we have the will? Fertility and Sterility*, *107*(4), 833–839.

- Meng, Y., Liang, Z., Zhang, C., Hao, S., Han, H., Du, P., ... & Liu, L. (2021). Ultrasonic modification of whey protein isolate: Implications for the structural and functional properties. *LWT*, 152, 112272
- Meullemiestre, A., Breil, C., Abert-Vian, M., & Chemat, F. (2017). Manothermosonication as a useful tool for lipid extraction from oleaginous microorganisms. *Ultrasonics sonochemistry*, 37, 216-221.
- Meza, B. E., Peralta, J. M., & Zorrilla, S. E. (2016). Rheological characterization of full-fat and low-fat glaze materials for foods. *Journal of Food Engineering*, 171, 57-66.
- Miladinov, V., Gennadios, A., & Hanna, M. (2002). *U.S. Patent Application No. 09/801,524*.
- Minakawa, A. F., Faria-Tischer, P. C., & Mali, S. (2019). Simple ultrasound method to obtain starch micro-and nanoparticles from cassava, corn and yam starches. *Food chemistry*, 283, 11-18.
- Mine, Y. (2002). Recent advances in egg protein functionality in the food system. *World's poultry science journal*, 58(1), 31-39.
- Mine, Y. (2007). Egg proteins and peptides in human health-chemistry, bioactivity and production. *Current Pharmaceutical Design*, 13(9), 875-884.
- Mirzanajafi-Zanjani, M., Yousefi, M., & Ehsani, A. (2019). Challenges and approaches for production of a healthy and functional mayonnaise sauce. *Food science & nutrition*, 7(8), 2471-2484.
- Mirzapour-Kouhdasht, A., Sabzipour, F., Taghizadeh, M. S., & Moosavi-Nasab, M. (2019). Physicochemical, rheological, and molecular characterization of colloidal gelatin produced from Common carp by-products using microwave and ultrasound-assisted extraction. *Journal of texture studies*, 50(5), 416-425.
- Mishra, N. (2020). Cereal  $\beta$  Glucan as a Functional Ingredient. In *Innovations in Food Technology* (pp. 109-122). Springer, Singapore.
- Mohammad, A. W., & Teow, Y. H. (2016). Ultrafiltration for Food Processing. *Reference Module in Food Science*.
- Momany, F. A., Sessa, D. J., Lawton, J. W., Selling, G. W., Hamaker, S. A., & Willett, J. L. (2006). Structural characterization of  $\alpha$ -zein. *Journal of agricultural and food chemistry*, 54(2), 543-547.

- Monroy, Y., Rivero, S., & García, M. A. (2018). Microstructural and techno-functional properties of cassava starch modified by ultrasound. *Ultrasonics sonochemistry*, *42*, 795-804.
- Morales, R., Martínez, K. D., Ruiz-Henestrosa, V. M. P., & Pilosof, A. M. (2015). Modification of foaming properties of soy protein isolate by high ultrasound intensity: Particle size effect. *Ultrasonics sonochemistry*, *26*, 48-55.
- Moreno, H. M., Domínguez-Timón, F., Díaz, M. T., Pedrosa, M. M., Borderías, A. J., & Tovar, C. A. (2020). Evaluation of gels made with different commercial pea protein isolate: Rheological, structural and functional properties. *Food Hydrocolloids*, *99*, 105375.
- Moriano, M. E., Cappa, C., & Alamprese, C. (2018). Reduced-fat soft-dough biscuits: Multivariate effects of polydextrose and resistant starch on dough rheology and biscuit quality. *Journal of Cereal Science*, *81*, 171-178.
- Mostafavi, F. S., Tehrani, M. M., & Mohebbi, M. (2017). Rheological and sensory properties of fat reduced vanilla ice creams containing milk protein concentrate (MPC). *Journal of Food Measurement and Characterization*, *11*(2), 567-575.
- Motamedzadegan, A., Alami, M., & Sheykharaabi, M. (2021). Effect of intensity and time ultrasound on yield and functional properties of extracted  $\beta$ -glucan of oat flour. *Food Science and Technology*, *17*(109), 117-127.
- Mudgil, D., Barak, S., & Khatkar, B. S. (2014). Guar gum: processing, properties and food applications—a review. *Journal of food science and technology*, *51*(3), 409-418.
- Mugo, E. M., Mahungu, S. M., Chikamai, B. N., & Mwove, J. K. (2020). Evaluation of gum arabic from *Acacia senegal* var *kerensis* and *Acacia senegal* var *senegal* as a stabilizer in low-fat yoghurt. *International Journal of Food Studies*, *9*.
- Mun, S., Kim, Y. L., Kang, C. G., Park, K. H., Shim, J. Y., & Kim, Y. R. (2009). Development of reduced-fat mayonnaise using 4 $\alpha$ GTase-modified rice starch and xanthan gum. *International journal of biological macromolecules*, *44*(5), 400-407.
- Munoz, L. M. J., Tavares, G. M., & Corredig, M. (2021). Design future foods using plant protein blends for best nutritional and technological functionality. *Trends in Food Science & Technology*.
- Muranyi, I. S., Otto, C., Pickardt, C., Koehler, P., & Schweiggert-Weisz, U. (2013). Microscopic characterisation and composition of proteins from lupin seed

- (*Lupinus angustifolius* L.) as affected by the isolation procedure. *Food research international*, 54(2), 1419-1429.
- Muranyi, I. S., Volke, D., Hoffmann, R., Eisner, P., Herfellner, T., Brunnbauer, M., ... & Schweiggert-Weisz, U. (2016). Protein distribution in lupin protein isolates from *Lupinus angustifolius* L. prepared by various isolation techniques. *Food chemistry*, 207, 6-15.
- Murray, B. S. (2020). Recent developments in food foams. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 101394.
- Muthukumarappan, K., & Swamy, G. J. (2018). Microstructure and its relationship with quality and storage stability of extruded products. In *Food microstructure and its relationship with quality and stability* (pp. 161-191). Woodhead Publishing.
- Nadathur, S. R., Wanasundara, J. P. D., & Scanlin, L. (2017). Proteins in the diet: Challenges in feeding the global population. In *Sustainable protein sources* (pp. 1-19). Academic Press.
- Nakashima, A., Yamada, K., Iwata, O., Sugimoto, R., Atsuji, K., Ogawa, T., ... & Suzuki, K. (2018).  $\beta$ -Glucan in foods and its physiological functions. *Journal of nutritional science and vitaminology*, 64(1), 8-17.
- Nasrabadi, M. N., Doost, A. S., & Mezzenga, R. (2021). Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products. *Food Hydrocolloids*, 106789.
- Nasri, M. (2019). Bioactive peptides from fish collagen byproducts: A review. *Byproducts from Agriculture and Fisheries: Adding Value for Food, Feed, Pharma, and Fuels*, 309-333.
- Nasrollahzadeh, M., Nezafat, Z., & Shafiei, N. (2021). Proteins in Food Industry. *Biopolymer-Based Metal Nanoparticle Chemistry for Sustainable Applications*, 3, 97-136.
- Nasrollahzadeh, M., Nezafat, Z., Shafiei, N., & Soleimani, F. (2021). *Polysaccharides in food industry* (pp. 47-96). In *Biopolymer-Based Metal Nanoparticle Chemistry for Sustainable Applications*. Elsevier: Iran.
- Nasrollahzadeh, M., Shafiei, N., & Nezafat, Z. (2021). *Application of biopolymers in bioplastics* (Vol. 2, pp. 1-44). Elsevier: Iran.
- Natarajan, S., & Ponnusamy, V. (2020). A review on the applications of ultrasound in food processing. *Materials Today: Proceedings*.

- Nayak, N. K., Pathak, V., Singh, V. P., Goswami, M., & Bharti, S. K. (2015). Quality of Carrageenan Incorporated Low Fat Chicken Nuggets during Refrigerated Storage at 4 o C. *Livestock Research International*, 3(1), 7-13.
- Nazari, S. M., Mortazavi, A., Hesari, J., & Tabatabaei Yazdi, F. (2020). Proteolysis and textural properties of low-fat ultrafiltered Feta cheese as influenced by maltodextrin. *International Journal of Dairy Technology*, 73(1), 244-254.
- Nesterenko, A., Alric, I., Silvestre, F., & Durrieu, V. (2013). Vegetable proteins in microencapsulation: A review of recent interventions and their effectiveness. *Industrial crops and products*, 42, 469-479.
- Neyestani–Mohammad, M. M. T. R., & Mohammadifar, A. (2014). Development of reduced-fat and reduced-energy dark chocolate using collagen hydrolysate as cocoa butter replacement agent. *Journal of Food and Nutrition Research (ISSN 1336-8672)*, 53(1), 13-21.
- Nguyen, P., Zhu, Y., & Prakash, S. (2020). Tribological Properties of Liquid Milks and Dairy Fat Structured Products. In *Dairy Fat Products and Functionality* (pp. 277-292). Springer, Cham.
- Ning, W., Xiaonan Z., Weining W., Liqi W., Lianzhou J., Tianyi L., & Dianyuan Y., (2021). Effect of high intensity ultrasound on the structure and solubility of soy protein isolate-pectin complex. *Ultrasonics Sonochemistry*. Volume 80, 105808.
- Ningtyas, D. W., & Prakash, S. (2020). Fat-Reduced Cream Cheeses. In *Dairy Fat Products and Functionality* (pp. 533-547). Springer, Cham.
- Ningtyas, D. W., Bhandari, B., Bansal, N., & Prakash, S. (2017). A tribological analysis of cream cheeses manufactured with different fat content. *International Dairy Journal*, 73, 155-165.
- Ningtyas, D. W., Bhandari, B., Bansal, N., & Prakash, S. (2018). Texture and lubrication properties of functional cream cheese: Effect of  $\beta$ -glucan and phytosterol. *Journal of texture studies*, 49(1), 11-22.
- Ningtyas, D. W., Bhandari, B., Bansal, N., & Prakash, S. (2019). Sequential aspects of cream cheese texture perception using temporal dominance of sensations (TDS) tool and its relation with flow and lubrication behaviour. *Food Research International*, 120, 586-594.
- Nishinari, K., Fang, Y., Guo, S., & Phillips, G. O. (2014). Soy proteins: A review on composition, aggregation and emulsification. *Food hydrocolloids*, 39, 301-318.

- Nishinari, K., Fang, Y., Nagano, T., Guo, S., & Wang, R. (2018). Soy as a food ingredient. In *Proteins in food processing* (pp. 149-186). Woodhead Publishing.
- Nitsuwat, S., Zhang, P., Ng, K., & Fang, Z. (2021). Fish gelatin as an alternative to mammalian gelatin for food industry: A meta-analysis. *LWT*, *141*, 110899.
- Niu, Y., Fang, H., Huo, T., Sun, X., Gong, Q., & Yu, L. (2020). A novel fat replacer composed by gelatin and soluble dietary fibers from black bean coats with its application in meatballs. *LWT*, *122*, 109000.
- O'Connor, T. P., & O'Brien, N. M. (2011). Butter and Other Milk Fat Products Fat Replacers. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 528–532.
- O'Connor, T. P., & O'Brien, N. M. (2016). *Fat Replacers. Reference Module in Food Science*. (pp. 1-5). Elsevier.
- O'Regan, J., & Mulvihill, D. M. (2011). Milk protein products| caseins and caseinates, industrial production, compositional standards, specifications, and regulatory aspects.
- O'Sullivan, J., Beevers, J., Park, M., Greenwood, R., & Norton, I. (2015). Comparative assessment of the effect of ultrasound treatment on protein functionality pre-and post-emulsification. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *484*, 89-98.
- O'Sullivan, M. G. (2016). Low-fat foods: Types and manufacture. *Encyclopedia of Food and Health*. 2016;571–575.
- O'Sullivan, M. G. (2017). CH9. Nutritionally optimised low fat foods. *A Handbook for Sensory and Consumer Driven New Product Development: Innovative Technologies for the Food and Beverage Industry*, Woodhead Publishing Ltd., UK, 177-196.
- O'Sullivan, M. G. (2020). Reduced-fat products and challenges. In *Salt, Fat and Sugar Reduction* (pp. 63–96). Elsevier.
- Obadi, M., & Xu, B. (2021). Review on the physicochemical properties, modifications, and applications of starches and its common modified forms used in noodle products. *Food Hydrocolloids*, *112*, 106286.
- O'brien, R. D. (2008). Margarine. In *Fats and oils: formulating and processing for applications*. CRC press.
- Ocheme, O. B., Adedeji, O. E., Chinma, C. E., Yakubu, C. M., & Ajibo, U. H. (2018). Proximate composition, functional, and pasting properties of wheat and

- groundnut protein concentrate flour blends. *Food science & nutrition*, 6(5), 1173-1178.
- OECD (2019). The Heavy Burden of Obesity: The Economics of Prevention. *Organization for Economic Co-operation and Development*. OECD.
- OECD. (2017). Obesity update 2017. *Organization for Economic Co-operation and Development*.
- Ognean, C. F., Darie, N., & Ognean, M. (2006). Fat replacers: review. *Journal of Agroalimentary processes and Technologies*, 12(2), 433-442.
- Ogut, F. O., Mu, T. H., Elahi, R., Zhang, M., & Sun, H. N. (2015). Ultrasonic modification of selected polysaccharides-review. *Journal of Food Processing & Technology*, 6(5), 1.
- Oh, I., Lee, J., Lee, H. G., & Lee, S. (2019). Feasibility of hydroxypropyl methylcellulose oleogel as an animal fat replacer for meat patties. *Food Research International*, 122, 566-572.
- Okonkwo, V. C., Kwofie, E. M., Mba, O. I., & Ngadi, M. O. (2021). Impact of thermo-sonication on quality indices of starch-based sauces. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105473.
- Olanwanit, W., & Rojanakorn, T. (2019). Effect of hydrolysed collagen and Man-sao powder mixture as a fat replacer on quality of Vienna sausages. *International Food Research Journal*, 26(5).
- Olawuyi, I. F., Kim, S. R., Hahn, D., & Lee, W. Y. (2020). Influences of combined enzyme-ultrasonic extraction on the physicochemical characteristics and properties of okra polysaccharides. *Food Hydrocolloids*, 100, 105396.
- Olivares, M. L., Shahrivar, K., & de Vicente, J. (2019). Soft lubrication characteristics of microparticulated whey proteins used as fat replacers in dairy systems. *Journal of Food Engineering*, 245, 157-165.
- Omayma, E., & Youssef, M. M. (2007). Fat replacers and their applications in food products: A review. *Journal Food Science and Technology*, 4(1), 29-44.
- Omran, N., Motamedzadegan, A., Naghizadeh Raisi, S., & Alimi, M. (2020). Chemical, textural, rheological, and sensorial properties of wheyless feta cheese as influenced by replacement of milk protein concentrate with pea protein isolate. *Journal of texture studies*, 51(3), 488-500.

- Omura, M. H., de Oliveira, A. P. H., de Souza Soares, L., dos Reis Coimbra, J. S., de Barros, F. A. R., Vidigal, M. C. T. R., ... & de Oliveira, E. B. (2021). Effects of protein concentration during ultrasonic processing on physicochemical properties and techno-functionality of plant food proteins. *Food Hydrocolloids*, 113, 106457.
- Oprea, M., & Voicu, S. I. (2020). Recent advances in composites based on cellulose derivatives for biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, 116683.
- Ortolan, F., & Steel, C. J. (2017). Protein characteristics that affect the quality of vital wheat gluten to be used in baking: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(3), 369-381.
- O'sullivan, M. (2016). *A handbook for sensory and consumer-driven new product development: Innovative technologies for the food and beverage industry*. Woodhead Publishing.
- O'Sullivan, M. G. (2020). Chapter Three: Reduced-fat products and challenges. *Salt, fat and sugar reduction*. O'Sullivan MG (editor). Duxford (UK): Elsevier Inc. Woodhead Publishing, 63-96.
- Ouyang, H., Kilcawley, K. N., Miao, S., Fenelon, M., Kelly, A., & Sheehan, J. J. (2021). Exploring the potential of polysaccharides or plant proteins as structuring agents to design cheeses with sensory properties focused toward consumers in East and Southeast Asia: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-14.
- Öztürk, B., Urgu, M., & Serdaroğlu, M. (2017). Egg white powder-stabilised multiple (water-in-olive oil-in-water) emulsions as beef fat replacers in model system meat emulsions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(7), 2075-2083.
- Öztürk-Kerimoğlu, B. (2021). A promising strategy for designing reduced-fat model meat emulsions by utilization of pea protein-agar agar gel complex. *Food Structure*, 100205.
- Paciulli, M., Littardi, P., Carini, E., Paradiso, V. M., Castellino, M., & Chiavaro, E. (2020). Inulin-based emulsion filled gel as fat replacer in shortbread cookies: Effects during storage. *LWT*, 133, 109888.
- Paglarini, C. D. S., Vidal, V. A. S., Martini, S., Cunha, R. L., & Pollonio, M. A. R. (2020). Protein-based hydrogelled emulsions and their application as fat replacers in meat products: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 1-16.

- Paglarini, C. S., Martini, S., & Pollonio, M. A. (2019). Physical properties of emulsion gels formulated with sonicated soy protein isolate. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(2), 451-459.
- Pancar, E. D., Andiç, S., & Boran, G. (2016). Comparative effects of fish and cow gelatins and locust bean gum on chemical, textural, and sensory properties of yogurt. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 25(6), 843-853.
- Panea, B., & Ripoll, G. (2021). Substituting fat with soy in low-salt dry fermented sausages. *NFS Journal*, 22, 1-5.
- Pang, Z., Deeth, H., Sharma, R., & Bansal, N. (2015). Effect of addition of gelatin on the rheological and microstructural properties of acid milk protein gels. *Food hydrocolloids*, 43, 340-351.
- Pang, Z., Deeth, H., Yang, H., Prakash, S., & Bansal, N. (2017). Evaluation of tilapia skin gelatin as a mammalian gelatin replacer in acid milk gels and low-fat stirred yogurt. *Journal of Dairy Science*, 100(5), 3436-3447.
- Paniwnyk, L. (2017). Applications of ultrasound in processing of liquid foods: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 794-806.
- Papalamprou, E., Doxastakis, G., & Kiosseoglou, V. (2006). Model salad dressing emulsion stability as affected by the type of the lupin seed protein isolate. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(12), 1932-1937.
- Patel, A. S., Yeung, C. K., Brennan, C., & Zheng, H. (2020). Ingredients & Formulation. Reference Module in Food Science.
- Patel, H., Patel, S., & Agarwal, S. (2014). Milk protein concentrates: Manufacturing and applications. *US Dairy Export Council*, 3-4.
- Patel, M. R., Baer, R. J., & Acharya, M. R. (2006). Increasing the protein content of ice cream. *Journal of dairy science*, 89(5), 1400-1406.
- Patey, S. J., & Corcoran, J. P. (2020). Physics of ultrasound. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*.
- Pathania, S., Parmar, P., & Tiwari, B. K. (2019). Stability of Proteins During Processing and Storage. In *Proteins: Sustainable Source, Processing and Applications* (pp. 295-330). Academic Press.
- Paulsen, P. V. (2009). Isolated soy protein usage in beverages. In *Functional and speciality beverage technology* (pp. 318-345). Woodhead Publishing.

- Pelgrom, P. J., Boom, R. M., & Schutyser, M. A. (2015). Functional analysis of mildly refined fractions from yellow pea. *Food Hydrocolloids*, *44*, 12-22.
- Peng, X., & Yao, Y. (2017). Carbohydrates as fat replacers. *Annual Review of Food Science and Technology*, *8*, 331-351.
- Pérez-Andrés, J. M., Charoux, C. M., Cullen, P. J., & Tiwari, B. K. (2018). Chemical modifications of lipids and proteins by nonthermal food processing technologies. *Journal of agricultural and food chemistry*, *66*(20), 5041-5054.
- Petcharat, T., Benjakul, S., Karnjanapratum, S., & Nalinanon, S. (2021). Ultrasound-assisted extraction of collagen from clown featherback (*Chitala ornata*) skin: yield and molecular characteristics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *101*(2), 648-658.
- Petkova, N. T., Sherova, G., & Denev, P. P. (2018). Characterization of inulin from dahlia tubers isolated by microwave and ultrasound-assisted extractions. *International Food Research Journal*, *25*(5).
- Petridis, D., Raizi, P., & Ritzoulis, C. (2014). Influence of citrus fiber, rice bran and collagen on the texture and organoleptic properties of low-fat frankfurters. *Journal of Food Processing and Preservation*, *38*(4), 1759-1771.
- Phanthong, P., Reubroycharoen, P., Hao, X., Xu, G., Abudula, A., & Guan, G. (2018). Nanocellulose: Extraction and application. *Carbon Resources Conversion*, *1*(1), 32-43.
- Pietrasik, Z., & Janz, J. A. M. (2010). Utilization of pea flour, starch-rich and fiber-rich fractions in low fat bologna. *Food Research International*, *43*(2), 602-608.
- Pietrasik, Z., & Soladoye, O. P. (2021). Use of native pea starches as an alternative to modified corn starch in low-fat bologna. *Meat Science*, *171*, 108283.
- Pollet, B. G., & Ashokkumar, M. (2019). Fundamental and applied aspects of ultrasonics and sonochemistry. In *Introduction to Ultrasound, Sonochemistry and Sonoelectrochemistry* (pp. 1-19). Springer, Cham.
- Pourmohammadi, K., & Abedi, E. (2020). The effect of pre and post-ultrasonication on the aggregation structure and physicochemical characteristics of tapioca starch containing sucrose, isomalt and maltodextrin. *International Journal of Biological Macromolecules*, *163*, 485-496.
- Preiss, J. (2018). Plant starch synthesis. In: *Starch in food*, 3-95.

- Prestes, R. C., Carneiro, E. B. B., & Demiate, I. M. (2012). Hydrolyzed collagen, modified starch and guar gum addition in turkey ham. *Ciência Rural*, 42, 1307-1313.
- Prindiville, E. A., Marshall, R. T., & Heymann, H. (2000). Effect of milk fat, cocoa butter, and whey protein fat replacers on the sensory properties of low-fat and nonfat chocolate ice cream. *Journal of dairy science*, 83(10), 2216-2223.
- Puri, R. K., Gandhi, G., Shashank, C. G., & Kaur, T. (2018). Mano-thermo-sonication in food preservation. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(7), 2743-2753.
- Qi, X., & Tester, R. F. (2018). Is Starch or Maltodextrin “Glucose?”. *Starch-Stärke*, 70(9-10), 1700304.
- Qin, Y., Xue, L., Hu, Y., Qiu, C., Jin, Z., Xu, X., & Wang, J. (2020). Green fabrication and characterization of debranched starch nanoparticles via ultrasonication combined with recrystallization. *Ultrasonics sonochemistry*, 66, 105074.
- Qiu, W. Y., Cai, W. D., Wang, M., & Yan, J. K. (2019). Effect of ultrasonic intensity on the conformational changes in citrus pectin under ultrasonic processing. *Food chemistry*, 297, 125021.
- Rababah, T., A Albiss, B., Al-U'datt, M., Akkam, Y., & Abu Kayed, A. (2021) Effect of Ultrasound Treatment on the Physicochemical, Nutraceutical, and Functional Properties of Lupine Flour. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23 (4), 825-838.
- Raghunathan, R., Pandiselvam, R., Kothakota, A., & Khaneghah, A. M. (2021). The application of emerging non-thermal technologies for the modification of cereal starches. *LWT*, 138, 110795.
- Rahaman, A., Kumari, A., Zeng, X. A., Farooq, M. A., Siddique, R., Khalifa, I., ... & Manzoor, M. F. (2021). Ultrasound based modification and structural-functional analysis of corn and cassava starch. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105795.
- Rahman, M. M., & Lamsal, B. P. (2021). Ultrasound-assisted extraction and modification of plant-based proteins: Impact on physicochemical, functional, and nutritional properties. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(2), 1457-1480.
- Rahman, M., & Hasan, M. R. (2019). Synthetic biopolymers. *Functional biopolymers*. Editors Jafar Mazumder MA, Sheardown H., Al-Ahmed A., editors.(Cham: Springer International Publishing, 1-43.

- Rahmati, N. F., Tehrani, M. M., Daneshvar, K., & Koocheki, A. (2015). Influence of selected gums and pregelatinized corn starch on reduced fat mayonnaise: modeling of properties by central composite design. *Food biophysics*, *10*(1), 39-50.
- Rakes, P. A., & Laaman, T. R. (2010). Hydrocolloids in frozen dairy desserts. *Hydrocolloids in food processing*, 109-140.
- Ran, X. G., & Wang, L. Y. (2014). Use of ultrasonic and pepsin treatment in tandem for collagen extraction from meat industry by-products. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *94*(3), 585-590.
- Rather, S. A., Masoodi, F. A., Akhter, R., Rather, J. A., Gani, A., Wani, S. M., & Malik, A. H. (2016). Application of guar-xanthan gum mixture as a partial fat replacer in meat emulsions. *Journal of food science and technology*, *53*(6), 2876-2886.
- Raymundo, A., Franco, J. M., Empis, J., & Sousa, I. (2002). Optimization of the composition of low-fat oil-in-water emulsions stabilized by white lupin protein. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *79*(8), 783-790.
- Razavi, S. M., & Behrouzian, F. (2018). Biopolymers for fat-replaced food design. In *Biopolymers for Food Design* (pp. 65-94). Academic Press.
- Rehman, S. U., Farkye, N. Y., Considine, T., Schaffner, A., & Drake, M. A. (2003). Effects of standardization of whole milk with dry milk protein concentrate on the yield and ripening of reduced-fat Cheddar cheese. *Journal of dairy science*, *86*(5), 1608-1615.
- Rempel, C., Geng, X., & Zhang, Y. (2019). Industrial scale preparation of pea flour fractions with enhanced nutritive composition by dry fractionation. *Food chemistry*, *276*, 119-128.
- Ren, X., Hou, T., Liang, Q., Zhang, X., Hu, D., Xu, B., ... & Ma, H. (2019). Effects of frequency ultrasound on the properties of zein-chitosan complex coacervation for resveratrol encapsulation. *Food chemistry*, *279*, 223-230
- Ren, Y., Song, K. Y., & Kim, Y. (2020). Physicochemical and retrogradation properties of low-fat muffins with inulin and hydroxypropyl methylcellulose as fat replacers. *Journal of Food Processing and Preservation*, *44*(10), e14816.
- Rezvani, F., Abbasi, H., & Nourani, M. (2020). Effects of protein-polysaccharide interactions on the physical and textural characteristics of low-fat whipped cream. *Journal of Food Processing and Preservation*, *44*(10), e14743.

- Riaz, T., Iqbal, M. W., Jiang, B., & Chen, J. (2021). A review of the enzymatic, physical, and chemical modification techniques of xanthan gum. *International Journal of Biological Macromolecules*.
- Richards, M. P. (2005). 8 Lipid Chemistry and Biochemistry. *Handbook of Food Science, Technology, and Engineering-4 Volume Set*.
- Rinaldoni, A. N., Palatnik, D. R., Zaritzky, N., & Campderros, M. E. (2014). Soft cheese-like product development enriched with soy protein concentrates. *LWT-Food science and Technology*, 55(1), 139-147.
- Rodriguez-Sandoval, E., Prasca-Sierra, I., & Hernandez, V. (2017). Effect of modified cassava starch as a fat replacer on the texture and quality characteristics of muffins. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(4), 1630-1639.
- Rogers, M. A. (2019) 4.50 - Novel Lipid Substitutes, Editor: Murray Moo-Young, *Comprehensive Biotechnology (Second Edition)*, Academic Press, 2011, 603–616.
- Rogers, M. A. (2018). *Encyclopedia of Food Chemistry: Fat replacers. Reference Module in Food Science*. 96-100
- Rojas-Nery, E., Güemes-Vera, N., Meza-Marquez, O. G., & Totosaus, A. (2015). Carrageenan type effect on soybean oil/soy protein isolate emulsion employed as fat replacer in panela-type cheese. *Grasas y Aceites*, 66(4), e097-e097.
- Rousselot (2021) Gelatin production process - World-class gelatin from Rousselot. <https://www.rousselot.com/functional/rousselot-gelatins/materials-fromnature>
- Rudan, M. A., Barbano, D. M., & Kindstedt, P. S. (1998). *Effect of Fat Replacer (Salatrim®) on Chemical Composition, Proteolysis, Functionality, Appearance, and Yield of Reduced Fat Mozzarella Cheese*. *Journal of Dairy Science*, 81(8), 2077–2088.
- Sá, A. G. A., Moreno, Y. M. F., & Carciofi, B. A. M. (2020). Plant proteins as high-quality nutritional source for human diet. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 170-184.
- Sacchi, R., & Paolillo, L. (2007). NMR for food quality and traceability. *Advances in food diagnostics*, 101-117.
- Sadahira, M. S., Rodrigues, M. I., Akhtar, M., Murray, B. S., & Netto, F. M. (2016). Effect of egg white protein-pectin electrostatic interactions in a high sugar

- content system on foaming and foam rheological properties. *Food hydrocolloids*, 58, 1-10.
- Salajegheh, M., Ardakani, S. A. Y., & Daneshi, M. (2018). Effect of inulin and carrageenan as a fat replacer on physicochemical, color and sensory properties of heated-sausage. *Afs-advances in food sciences*, 66.
- Salari, S., Zanganeh, M., Fadavi, A., & Ahmadi, Z. (2017). Effect of Xanthan Gum and Carboxymethyl Cellulose on Physical Properties of Cream Cheese. *International Journal of Advanced Technology*, 8, 176.
- Salunke, P. (2013). Impact of transglutaminase on the functionality of milk protein concentrate and micellar casein concentrate.
- Samakradhamrongthai, R. S., Jannu, T., Supawan, T., Khawsud, A., Aumpa, P., & Renaldi, G. (2021). Inulin application on the optimization of reduced-fat ice cream using response surface methodology. *Food Hydrocolloids*, 119, 106873.
- Sánchez-Obando, J. D., Cabrera-Trujillo, M. A., Olivares-Tenorio, M. L., & Klotz, B. (2020). Use of optimized microparticulated whey protein in the process of reduced-fat spread and petit-suisse cheeses. *LWT*, 120, 108933.
- Sandoval-Castilla, O., Lobato-Calleros, C., Aguirre-Mandujano, E., & Vernon-Carter, E. J. (2004). Microstructure and texture of yogurt as influenced by fat replacers. *International Dairy Journal*, 14(2), 151-159.
- Santana, J. C., Gardim, R. B., Almeida, P. F., Borini, G. B., Quispe, A. P., Llanos, S. A., ... & Berssaneti, F. T. (2020). Valorization of chicken feet by-product of the poultry industry: high qualities of gelatin and biofilm from extraction of collagen. *Polymers*, 12(3), 529.
- Santos, M. M., Lima, D. A., Madruga, M. S., & Silva, F. A. (2020). Lipid and protein oxidation of emulsified chicken patties prepared using abdominal fat and skin. *Poultry science*, 99(3), 1777-1787.
- Sanz, T., Quiles, A., Salvador, A., & Hernando, I. (2017). Structural changes in biscuits made with cellulose emulsions as fat replacers. *Food Science and Technology International*, 23(6), 480-489.
- Sapozhnikov, O. A. (2015). High-intensity ultrasonic waves in fluids: Nonlinear propagation and effects. In *Power Ultrasonics* (pp. 9-35). Woodhead Publishing.
- Sato, K., & Ueno, S. (2014). Physical properties of fats in food. In *Fats in Food Technology 2e*. Rajah, K. K. (Ed.). p. 1–38.

- Schädle, C. N., Eisner, P., & Bader-Mittermaier, S. (2020). The combined effects of different fat replacers and rennet casein on the properties of reduced-fat processed cheese. *Journal of dairy science*, *103*(5), 3980-3993.
- Schäfer, J., Hinrichs, J., Kohlus, R., Huppertz, T., & Atamer, Z. (2021). Pilot scale processing and characterisation of calcium-reduced micellar casein concentrate powders. *International Dairy Journal*, *113*, 104888.
- Schlegel, K., Sontheimer, K., Hickisch, A., Wani, A. A., Eisner, P., & Schweiggert-Weisz, U. (2019). Enzymatic hydrolysis of lupin protein isolates-Changes in the molecular weight distribution, technofunctional characteristics, and sensory attributes. *Food science & nutrition*, *7*(8), 2747-2759.
- Schmidt, M. M., Dornelles, R. C. P., Mello, R. O., Kubota, E. H., Mazutti, M. A., Kempka, A. P., & Demiate, I. M. (2016). Collagen extraction process. *International Food Research Journal*, *23*(3).
- Schmiele, M., Mascarenhas, M. C. C. N., da Silva Barretto, A. C., & Pollonio, M. A. R. (2015). Dietary fiber as fat substitute in emulsified and cooked meat model system. *LWT-Food Science and Technology*, *61*(1), 105-111.
- Schrieber, R., & Gareis, H. (2007). Practical Aspects. In *Gelatine handbook: theory and industrial practice* (pp. 119-299) John Wiley & Sons.
- Senanayake, S. P. J. N., & Shahidi, F. (2005). Dietary Fat Substitutes. In *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. Wiley.
- Senrayan, J., & Venkatachalam, S. (2020). Ultrasonic acoustic-cavitation as a novel and emerging energy efficient technique for oil extraction from kapok seeds. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *62*, 102347.
- Serdaroglu, M., & Ozsumer, M. S. (2003). Effects of soy protein, whey powder and wheat gluten on quality characteristics of cooked beef sausages formulated with 5, 10 and 20% fat. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, *6*(2), 3.
- Serdaroğlu, M., Nacak, B., & Karabıyıköğlü, M. (2017). Effects of beef fat replacement with gelled emulsion prepared with olive oil on quality parameters of chicken patties. *Korean journal for food science of animal resources*, *37*(3), 376.
- Serdaroğlu, M., Nacak, B., Karabıyıköğlü, M., & Keser, G. (2016). Effects of partial beef fat replacement with gelled emulsion on functional and quality properties of model system meat emulsions. *Korean journal for food science of animal resources*, *36*(6), 744.

- Serinyel, G., & Öztürk, S. (2017). Investigation on potential utilization of native and modified starches containing resistant starch as a fat replacer in bakery products. *Starch-Stärke*, 69(3-4), 1600022.
- Serna-Saldivar, S. O. (2016). Maize: foods from maize. In *Encyclopedia of Food Grains*, 97–109.
- Setyaningsih, W., Saputro, I. E., Carrera, C. A., & Palma, M. (2019). Optimisation of an ultrasound-assisted extraction method for the simultaneous determination of phenolics in rice grains. *Food chemistry*, 288, 221-227.
- Sha, L., Koosis, A. O., Wang, Q., True, A. D., & Xiong, Y. L. (2021). Interfacial dilatational and emulsifying properties of ultrasound-treated pea protein. *Food Chemistry*, 350, 129271.
- Sha, X. M., Hu, Z. Z., Ye, Y. H., Xu, H., & Tu, Z. C. (2019). Effect of extraction temperature on the gelling properties and identification of porcine gelatin. *Food Hydrocolloids*, 92, 163-172.
- Shahbazi, M., Jäger, H., Ettelaie, R., & Chen, J. (2021). Construction of 3D printed reduced-fat meat analogue by biosurfactants. Part I: Flow behavior, thixotropic feature, and network structure of soy protein-based inks. *Food Hydrocolloids*, 106967.
- Shahidi, F., & Senanayake, S. N. (2007). Fat replacers. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*.
- Shahidi, F., Peng, H., & Senanayake, N. (2020). Dietary Fat Substitutes. *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, 1-36.
- Shahiri Tabarestani, H., & Mazaheri Tehrani, M. (2014). Optimization of physicochemical properties of low-fat hamburger formulation using blend of soy flour, split-pea flour and wheat starch as part of fat replacer system. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(1), 278-288.
- Shand, P. J. (1997). Mimetic and synthetic fat replacers for the meat industry. In *Production and processing of healthy meat, poultry and fish products* (pp. 191-209). Springer, Boston, MA.
- Sharma, A., Garg, S., Sheikh, I., Vyas, P., & Dhaliwal, H. S. (2020). Effect of wheat grain protein composition on end-use quality. *Journal of Food Science and Technology*, 57(8), 2771-2785.

- Shen, X., Fang, T., Gao, F., & Guo, M. (2017). Effects of ultrasound treatment on physicochemical and emulsifying properties of whey proteins pre-and post-thermal aggregation. *Food Hydrocolloids*, 63, 668-676.
- Shenana, M. E. (2021). Improving the Quality of Low-Fat Ice Cream Using Some Fat Replacers. *Annals of Agricultural Science, Moshtohor*, 59(2), 463-472.
- Sheng, L., Wang, Y., Chen, J., Zou, J., Wang, Q., & Ma, M. (2018). Influence of high-intensity ultrasound on foaming and structural properties of egg white. *Food Research International*, 108, 604-610.
- Shewry, P. R., & Casey, R. (1999). Seed proteins. In *Seed proteins* (pp. 1-10). Springer, Dordrecht.
- Shi, D. S., Li, C. H., Stone, A. K., Guldiken, B., & Nickerson, M. T. (2021). Recent Developments in Processing, Functionality, and Food Applications of Microparticulated Proteins. *Food Reviews International*, 1-24.
- Shoib, M., Shehzad, A., Omar, M., Rakha, A., Raza, H., Sharif, H. R., ... & Niazi, S. (2016). Inulin: Properties, health benefits and food applications. *Carbohydrate polymers*, 147, 444-454.
- Shrestha, S., van't Hag, L., Haritos, V. S., & Dhital, S. (2021). Lupin proteins: Structure, isolation and application. *Trends in Food Science & Technology*.
- Shukla, R., & Cheryan, M. (2001). Zein: the industrial protein from corn. *Industrial crops and products*, 13(3), 171-192.
- Siburian, W. Z., Rochima, E., Andriani, Y., & Praseptianga, D. (2020). Fish gelatin (definition, manufacture, analysis of quality characteristics, and application): A review. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 8(4), 90-95.
- Sikorski, Z. E., & Sinkiewicz, I. (2010). 17 The Role of Lipids in Meat. *Chemical, Biological, and Functional Aspects of Food Lipids*, 327.
- Silva Lannes, S. C. da, & Maria, R. (2013). *Structuring Fat Foods. Food Industry*.
- Silva, J. V., & O'Mahony, J. A. (2018). Microparticulated whey protein addition modulates rheological and microstructural properties of high-protein acid milk gels. *International Dairy Journal*, 78, 145-151.
- Singh, R. S., Singh, T., Hassan, M., & Larroche, C. (2021). Biofuels from Inulin-rich Feedstocks: A Comprehensive Review. *Bioresource Technology*, 126606.

- Sionkowska, A., Skrzyński, S., Śmiechowski, K., & Kołodziejczak, A. (2017). The review of versatile application of collagen. *Polymers for Advanced Technologies*, 28(1), 4-9.
- Smith, K. W. (2015). Specialty oils and fats in ice cream. In *Specialty oils and fats in food and nutrition* (pp. 271-284). Woodhead Publishing.
- Smith, K. W. (2015). Structured triacylglycerols: Properties and processing for use in food. In *Specialty oils and fats in food and nutrition* (pp. 207-218). Woodhead Publishing.
- Sołowiej, B., Glibowski, P., Muszyński, S., Wydrych, J., Gawron, A., & Jeliński, T. (2015). The effect of fat replacement by inulin on the physicochemical properties and microstructure of acid casein processed cheese analogues with added whey protein polymers. *Food Hydrocolloids*, 44, 1-11.
- Song, B., Zhang, Y., Yang, B., Zhu, P., Pang, X., Xie, N., ... & Lv, J. (2021). Effect of Different Temperature-Controlled Ultrasound on the Physical and Functional Properties of Micellar Casein Concentrate. *Foods*, 10(11), 2673.
- Song, J., Sun, C., Zhang, J., Xiong, Z., & Fang, Y. (2020). Fabrication, Characterization, and Formation Mechanism of Zein–Gum Arabic Nanocomposites in Aqueous Ethanol Solution with a High Ethanol Content. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(46), 13138-13145.
- Soria, A. C., Villamiel, M., & Montilla, A. (2017). Ultrasound effects on processes and reactions involving carbohydrates. *Ultrasound in Food Processing: Recent Advances*, 437.
- Sousa, S. C., Fragoso, S. P., Penna, C. R., Arcanjo, N. M., Silva, F. A., Ferreira, V. C., ... & Araújo, Í. B. (2017). Quality parameters of frankfurter-type sausages with partial replacement of fat by hydrolyzed collagen. *LWT-Food Science and Technology*, 76, 320-325.
- Souza, C. V. B., Bellucci, E. R. B., Lorenzo, J. M., & Barretto, A. C. D. S. (2019). Low-fat Brazilian cooked sausage-Paio—with added oat fiber and inulin as a fat substitute: effect on the technological properties and sensory acceptance. *Food Science and Technology*, 39, 295-303.
- Stefanović, A. B., Jovanović, J. R., Dojčinović, M. B., Lević, S. M., Nedović, V. A., Bugarski, B. M., & Knežević-Jugović, Z. D. (2017). Effect of the controlled high-intensity ultrasound on improving functionality and structural changes of egg white proteins. *Food and Bioprocess Technology*, 10(7), 1224-1239.
- Stowell, J. D. (2009). Polydextrose. In *Fiber ingredients* (pp. 187-218). CRC Press

- Strixner, T., & Kulozik, U. (2011). Egg proteins. In *Handbook of food proteins* (pp. 150-209). Woodhead publishing.
- Su, Y. K., Bowers, J. A., & Zayas, J. F. (2000). Physical characteristics and microstructure of reduced-fat frankfurters as affected by salt and emulsified fats stabilized with nonmeat proteins. *Journal of Food Science*, 65(1), 123-128.
- Sui, X., Zhang, T., & Jiang, L. (2021). Soy Protein: Molecular Structure Revisited and Recent Advances in Processing Technologies. *Annual Review of Food Science and Technology*, 12, 119-147.
- Sulejmani, E., Boran, O. S., Huppertz, T., & Hayaloglu, A. A. (2021). Rheology, microstructure and sensory properties of low-fat milk jam: Influence of inulin type, sucrose content, sodium bicarbonate and calcium chloride. *International Dairy Journal*, 123, 105162.
- Summo, C., De Angelis, D., Difonzo, G., Caponio, F., & Pasqualone, A. (2020). Effectiveness of oat-hull-based ingredient as fat replacer to produce low fat burger with high beta-glucans content. *Foods*, 9(8), 1057.
- Sun, C., & Fang, Y. (2021). Replacement of Fat or Starch. In *Food Hydrocolloids* (pp. 409-444). Springer, Singapore.
- Sun, C., Liu, R., Liang, B., Wu, T., Sui, W., & Zhang, M. (2018). Microparticulated whey protein-pectin complex: A texture-controllable gel for low-fat mayonnaise. *Food Research International*, 108, 151-160.
- Sun, C., Liu, R., Wu, T., Liang, B., Shi, C., & Zhang, M. (2015). Effect of superfine grinding on the structural and physicochemical properties of whey protein and applications for microparticulated proteins. *Food science and biotechnology*, 24(5), 1637-1643.
- Sun, D., Fan, W., Xu, Y., & Wang, L. (2017). Functional properties of soy protein isolate and its application in foods. In *Proceedings of the 2016 International Conference on Biotechnology & Medical Science* (pp. 630-636).
- Sun, J., Chang, C., Su, Y., Gu, L., Yang, Y., & Li, J. (2022). Impact of saccharides on the foam properties of egg white: Correlation between rheological, interfacial properties and foam properties. *Food Hydrocolloids*, 122, 107088.
- Sun, L., Chen, W., Liu, Y., Li, J., & Yu, H. (2015). Soy protein isolate/cellulose nanofiber complex gels as fat substitutes: rheological and textural properties and extent of cream imitation. *Cellulose*, 22(4), 2619-2627.

- Sun, L., Hu, M., Zhao, J., Lv, L., Zhang, Y., Liu, Q., ... & Zhang, Y. (2021). Molecular Characteristics, Synthesis, and Food Application of Cereal  $\beta$ -Glucan. *Journal of Food Quality*, 2021.
- Sunkesula, V., Kommineni, A., Meletharayil, G. H., Marella, C., & Metzger, L. E. (2021). Effect of pH on the heat stability of reconstituted reduced calcium milk protein concentrate dispersions. *Journal of Dairy Science*, 104(1), 134-137.
- Sussmann, D., Pickardt, C., Schweiggert, U., & Eisner, P. (2013). Influence of different processing parameters on the isolation of lupin (*Lupinus angustifolius* L.) protein isolates: a preliminary study. *Journal of Food Process Engineering*, 36(1), 18-28.
- Suurs, P., & Barbut, S. (2020). Collagen use for co-extruded sausage casings—A review. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 91-101.
- Swanson, B. G. (2003). FATS| Fat Replacers. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, 2284-2287.
- Szpicer, A., Onopiuk, A., Póltorak, A., & Wierzbicka, A. (2020). The influence of oat  $\beta$ -glucan content on the physicochemical and sensory properties of low-fat beef burgers. *CyTA-Journal of Food*, 18(1), 315-327.
- Tahereh, J., Mahin, A., & Mojtaba, R. (2017). Determinative Effects of Fat Replacement and Homogenization on the Sensory and Rheological Properties of Low-Fat Mozzarella. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(1), e12753.
- Talbot, G. (2014). Fats for chocolate and sugar confectionery. *Fats in Food Technology, 2nd edition. Rajah KK (Ed.). John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, UK.*
- Talbot, G. (2015). Specialty oils and fats in confectionery. In *Specialty Oils and Fats in Food and Nutrition* (pp. 221-239). Woodhead Publishing.
- Tan, M., Nawaz, M. A., & Buckow, R. (2021). Functional and food application of plant proteins—a review. *Food Reviews International*, 1-29.
- Tang, C. H. (2021). Nano-architectural assembly of soy proteins: A promising strategy to fabricate nutraceutical nanovehicles. *Advances in Colloid and Interface Science*, 102402.
- Tanger, C., Schmidt, F., Utz, F., Kreissl, J., Dawid, C., & Kulozik, U. (2021). Pea protein microparticulation using extrusion cooking: Influence of extrusion parameters and drying on microparticle characteristics and sensory by

- application in a model milk dessert. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 102851.
- Tanti, R., Barbut, S., & Marangoni, A. G. (2016). Hydroxypropyl methylcellulose and methylcellulose structured oil as a replacement for shortening in sandwich cookie creams. *Food Hydrocolloids*, 61, 329-337.
- Tapia-Hernández, J. A., Del-Toro-Sánchez, C. L., Cinco-Moroyoqui, F. J., Juárez-Onofre, J. E., Ruiz-Cruz, S., Carvajal-Millan, E., ... & Rodríguez-Felix, F. (2019). Prolamins from cereal by-products: Classification, extraction, characterization and its applications in micro-and nanofabrication. *Trends in Food Science & Technology*, 90, 111-132.
- Tarté, R. (2011). Meat protein ingredients. In *Handbook of food proteins* (pp. 56-91). Woodhead Publishing.
- Tavakolipour, H., Vahid-moghadam, F., & Jamdar, F. (2014). Textural and sensory properties of lowfat concentrated flavored yogurt by using modified waxy corn starch and gelatin as a fat replacer. *Int J Biosci*, 5(6), 61-67.
- Teklehaimanot, W. H., Duodu, K. G., & Emmambux, M. N. (2013). Maize and teff starches modified with stearic acid as potential fat replacer in low calorie mayonnaise-type emulsions. *Starch-Stärke*, 65(9-10), 773-781.
- Teng, F., He, M., Xu, J., Chen, F., Wu, C., Wang, Z., & Li, Y. (2020). Effect of ultrasonication on the stability and storage of a soy protein isolate-phosphatidylcholine nanoemulsions. *Scientific Reports*, 10(1), 1-9.
- Thrane, M., Paulsen, P. V., Orcutt, M. W., & Krieger, T. M. (2017). Soy protein: Impacts, production, and applications. In *Sustainable protein sources* (pp. 23-45). Academic Press.
- Tian, H., Guo, G., Fu, X., Yao, Y., Yuan, L., & Xiang, A. (2018). Fabrication, properties and applications of soy-protein-based materials: A review. *International journal of biological macromolecules*, 120, 475-490.
- Tiefenbacher, K. F. (2017). Chapter Two-Technology of Main Ingredients—Water and Flours. *Wafer and Waffle, Processing and Manufacturing*, 15-121.
- Thirunavookarasu, S. N., Kumar, S., Kalakandan, S. K., Shanmugam, A., Arunkumar Anandharaj, S. C., Sivanandham, V., & Rawson, A. (2021). Effect of ultrasound treatment on soy protein: Rice starch interaction.

- Tiwari, B. K., & Mason, T. J. (2012). Ultrasound processing of fluid foods. In *Novel thermal and non-thermal technologies for fluid foods* (pp. 135-165). Academic press.
- Torres, I. C., Amigo, J. M., Knudsen, J. C., Tolkach, A., Mikkelsen, B. Ø., & Ipsen, R. (2018). Rheology and microstructure of low-fat yoghurt produced with whey protein microparticles as fat replacer. *International Dairy Journal*, *81*, 62-71.
- Triyono, A., Andriansyah, R. C. E., Luthfiyanti, R., & Rahman, T. (2017, December). Development of modified starch technology (maltodextrin) from commercial tapioca on semi production scale using oil heater dextrinator. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 101, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.
- Tufeanu, R., & Tița, O. (2016). Possibilities to develop low-fat products: a review. *Acta Universitatis Cibiniensis. Series E: Food Technology*, *20*(1), 3-19.
- Turantaş, F., Kılıç, G. B., & Kılıç, B. (2015). Ultrasound in the meat industry: General applications and decontamination efficiency. *International journal of food microbiology*, *198*, 59-69.
- Ulbrich, M., Bai, Y., & Flöter, E. (2020). The supporting effect of ultrasound on the acid hydrolysis of granular potato starch. *Carbohydrate polymers*, *230*, 115633.
- Uluko, H., Liu, L., Lv, J. P., & Zhang, S. W. (2016). Functional characteristics of milk protein concentrates and their modification. *Critical reviews in food science and nutrition*, *56*(7), 1193-1208.
- Urgu, M., Türk, A., Ünlütürk, S., Kaymak-Ertekin, F., & Koca, N. (2019). Milk fat substitution by microparticulated protein in reduced-fat cheese emulsion: The effects on stability, microstructure, rheological and sensory properties. *Food science of animal resources*, *39*(1), 23.
- Valenzuela, B., & Sanhueza, C. (2008). Structured lipids and fat substitutes, the future lipids?. *Revista chilena de nutrición*, *35*(4), 394-405.
- Van de Noort, M. (2017). Lupin: An important protein and nutrient source. In *Sustainable protein sources* (pp. 165-183). Academic Press.
- Vargas, S. A., Delgado-Macuil, R. J., Ruiz-Espinosa, H., Rojas-López, M., & Amador-Espejo, G. G. (2021). High-intensity ultrasound pretreatment influence on whey protein isolate and its use on complex coacervation with kappa carrageenan: Evaluation of selected functional properties. *Ultrasonics sonochemistry*, *70*, 105340.

- Vargas-Meza, J., Jáuregui, A., Pacheco-Miranda, S., Contreras-Manzano, A., & Barquera, S. (2019). *Front-of-pack nutritional labels: Understanding by low- and middle-income Mexican consumers. PLOS ONE, 14(11), e0225268.*
- Vatansever, S., Tulbek, M. C., & Riaz, M. N. (2020). Low-and high-moisture extrusion of pulse proteins as plant-based meat ingredients: A review. *Cereal Foods World, 65(4), 12-14.*
- Veena, N., Nath, S., & Arora, S. (2016). Polydextrose as a functional ingredient and its food applications: a review. *Indian Journal of Dairy Science, 69(3), 239-251.*
- Vela, A. J., Villanueva, M., Solaesa, Á. G., & Ronda, F. (2021). Impact of high-intensity ultrasound waves on structural, functional, thermal and rheological properties of rice flour and its biopolymers structural features. *Food Hydrocolloids, 113, 106480.*
- Venus, H., Hossein, E. A., & Ahmad, P. (2021). Textural properties of low fat mayonnaise with whey protein concentrate and Tragacanth gum as egg and fat substitutes. *Foods and Raw materials, 9(1), 19-23.*
- Villarino, C. B. J., Jayasena, V., Coorey, R., Chakrabarti-Bell, S., & Johnson, S. K. (2016). Nutritional, health, and technological functionality of lupin flour addition to bread and other baked products: Benefits and challenges. *Critical reviews in food science and nutrition, 56(5), 835-857.*
- Visakh, P. M. (2017). Soy protein: introduction, structure and properties relationship. *Soy Protein-Based Blends, Composites and Nanocomposites, 23.*
- Völp, A. R., Seitz, J., & Willenbacher, N. (2021). Structure and rheology of foams stabilized by lupin protein isolate of *Lupinus. angustifolius*. *Food Hydrocolloids, 106919.*
- Wagh, A., & Martini, S. (2017). 11 Crystallization Behavior of Fats Effects of Processing Conditions. *Food lipids: Chemistry, nutrition, and biotechnology.*
- Wan, Z. L., Guo, J., & Yang, X. Q. (2015). Plant protein-based delivery systems for bioactive ingredients in foods. *Food & function, 6(9), 2876-2889.*
- Wang, C., Killpatric, A., Humphrey, A., & Guo, M. (2019). Whey protein functional properties and applications in food formulations. *Whey protein production, chemistry, functionality, and applications: Wiley.*
- Wang, C., Qiu, W. Y., Chen, T. T., & Yan, J. K. (2021). Effects of structural and conformational characteristics of citrus pectin on its functional properties. *Food Chemistry, 339, 128064.*

- Wang, F., Tong, Q., Luo, J., Xu, Y., & Ren, F. (2016). Effect of Carrageenan on Physicochemical and Functional Properties of Low-Fat Colby Cheese. *Journal of food science*, 81(8), E1949-E1955.
- Wang, F., Zhang, Q., Huang, K., Li, J., Wang, K., Zhang, K., & Tang, X. (2020). Preparation and characterization of carboxymethyl cellulose containing quaternized chitosan for potential drug carrier. *International journal of biological macromolecules*, 154, 1392-1399.
- Wang, G., & Guo, M. (2019). Manufacturing technologies of whey protein products. *Whey Protein Production, Chemistry, Functionality, and Applications*, 13-37.
- Wang, H., Xu, K., Ma, Y., Liang, Y., Zhang, H., & Chen, L. (2020). Impact of ultrasonication on the aggregation structure and physicochemical characteristics of sweet potato starch. *Ultrasonics sonochemistry*, 63, 104868.
- Wang, L., Gotoh, T., Wang, Y., Kouyama, T., & Wang, J. Y. (2017). Formation of a mimetic biomembrane from the hydrophobic protein zein and phospholipids: Structure and application. *The Journal of Physical Chemistry C*, 121(36), 19999-20006.
- Wang, Q., Wang, Y., Huang, M., Hayat, K., Kurtz, N. C., Wu, X., ... & Zheng, F. (2021). Ultrasound-assisted alkaline proteinase extraction enhances the yield of pecan protein and modifies its functional properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105789.
- Wang, T., Chen, K., Zhang, X., Yu, Y., Yu, D., Jiang, L., & Wang, L. (2021). Effect of ultrasound on the preparation of soy protein isolate-maltodextrin embedded hemp seed oil microcapsules and the establishment of oxidation kinetics models. *Ultrasonics sonochemistry*, 77, 105700.
- Wang, X., Majzoobi, M., & Farahnaky, A. (2020). Ultrasound-assisted modification of functional properties and biological activity of biopolymers: A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 65, 105057.
- Wang, Y., Zhang, Z., He, R., Liu, D., Mintah, B. K., Dabbour, M., & Ma, H. (2020). Improvement in enzymolysis efficiency and changes in conformational attributes of corn gluten meal by dual-frequency slit ultrasonication action. *Ultrasonics sonochemistry*, 64, 105038.
- Wang, Y., Zheng, H., Li, Y., Li, B., & Chen, Y. (2015). One step procedure for desalting salty egg white and preparing fat analogue and its application in mayonnaise. *Food Hydrocolloids*, 45, 317-326.

- Wassell, P. (2014). Bakery fats. *Fats in Food Technology, 2nd ed.; Rajah, KK, Ed*, 39-81.
- Weiss, J., Kristbergsson, K., & Kjartansson, G. T. (2011). Engineering food ingredients with high-intensity ultrasound. In *Ultrasound technologies for food and bioprocessing* (pp. 239-285). Springer, New York, NY.
- Weissmueller, N. T., Lu, H. D., Hurley, A., & Prud'homme, R. K. (2016). Nanocarriers from GRAS zein proteins to encapsulate hydrophobic actives. *Biomacromolecules*, *17*(11), 3828-3837.
- Wen, C., Zhang, J., Zhang, H., Duan, Y., & Ma, H. (2020). Plant protein-derived antioxidant peptides: Isolation, identification, mechanism of action and application in food systems: A review. *Trends in Food Science & Technology*.
- Wen, C., Zhang, J., Zhang, H., Dzah, C. S., Zandile, M., Duan, Y., ... & Luo, X. (2018). Advances in ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from cash crops—A review. *Ultrasonics sonochemistry*, *48*, 538-549.
- Werlang, S., Bonfante, C., Oro, T., Biduski, B., Bertolin, T. E., & Gutkoski, L. C. (2021). Native and annealed oat starches as a fat replacer in mayonnaise. *Journal of Food Processing and Preservation*, *45*(3), e15211.
- WHO (2020). Obesity and overweight. World Health Organization. Retrieved 1 de april de 2021, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>
- Widyasari, R., & Rawdkuen, S. (2014). Extraction and characterization of gelatin from chicken feet by acid and ultrasound assisted extraction. *Food and Applied Bioscience Journal*, *2*(1), 85-97.
- Wieser, H. (2007). Chemistry of gluten proteins. *Food microbiology*, *24*(2), 115-119.
- Wieser, H., Koehler, P., & Scherf, K. A. (2020). Chemical composition of wheat grains. *Wheat - An Exceptional Crop*, 13–45.
- Wischhusen, J., & Padilla, F. (2019). Ultrasound molecular imaging with targeted microbubbles for cancer diagnostics: from bench to bedside. *Irbm*, *40*(1), 3-9.
- WOF.org (2020). Scorecards - Obesity: Missing the 2025 targets. World Obesity Federation Global Obesity Observatory. <https://data.worldobesity.org/publications/?cat=2>

- Wongkaew, M., Sommano, S. R., Tangpao, T., Rachtanapun, P., & Jantanasakulwong, K. (2020). Mango peel pectin by microwave-assisted extraction and its use as fat replacement in dried Chinese sausage. *Foods*, *9*(4), 450.
- Worrasinchai, S., Suphantharika, M., Pinjai, S., & Jamnong, P. (2006).  $\beta$ -Glucan prepared from spent brewer's yeast as a fat replacer in mayonnaise. *Food hydrocolloids*, *20*(1), 68-78.
- Wu, C., & Zhou, X. (2018). The Overview of Functional Starch. In *Functional starch and applications in food* (pp. 1-26). Springer, Singapore
- Wu, J. (2014). 19 Eggs and Egg Products Processing. *Principles and Applications*, 437.
- Wu, Q., Zhang, X., Jia, J., Kuang, C., & Yang, H. (2018). Effect of ultrasonic pretreatment on whey protein hydrolysis by alcalase: Thermodynamic parameters, physicochemical properties and bioactivities. *Process Biochemistry*, *67*, 46-54.
- Wu, S., Li, G., Xue, Y., Ashokkumar, M., Zhao, H., Liu, D., ... & Hemar, Y. (2020). Solubilisation of micellar casein powders by high-power ultrasound. *Ultrasonics sonochemistry*, *67*, 105131.
- Wu, W., & Sun, R. (2012). Toxicological studies on plant proteins: a review. *Journal of Applied Toxicology*, *32*(6), 377-386.
- Wu, W., Kong, X., Zhang, C., Hua, Y., & Chen, Y. (2018). Improving the stability of wheat gliadin nanoparticles—Effect of gum arabic addition. *Food hydrocolloids*, *80*, 78-87.
- Xia, X., Tobin, J. T., Subhir, S., Fenelon, M. A., McSweeney, P. L., & Sheehan, J. J. (2021). Effect of thermal treatment on serum protein reduced micellar casein concentrate: An evaluation of rennet coagulability, cheese composition and yield. *International Dairy Journal*, *114*, 104902.
- Xiao, N., Huang, X., He, W., Yao, Y., Wu, N., Xu, M., ... & Tu, Y. (2021). A review on recent advances of egg byproducts: Preparation, functional properties, biological activities and food applications. *Food Research International*, 110563.
- Xiao, Y., Wu, X., Zhang, B., Luo, F., Lin, Q., & Ding, Y. (2021). Understanding the aggregation structure, digestive and rheological properties of corn, potato, and pea starches modified by ultrasonic frequency. *International Journal of Biological Macromolecules*, *189*, 1008-1019

- Xie, Y., Lei, Y., Rong, J., Zhang, X., Li, J., Chen, Y., ... & Liu, S. (2021). Physico-chemical properties of reduced-fat biscuits prepared using O/W cellulose-based pickering emulsion. *LWT*, *148*, 111745.
- Xiong, T., Xiong, W., Ge, M., Xia, J., Li, B., & Chen, Y. (2018). Effect of high intensity ultrasound on structure and foaming properties of pea protein isolate. *Food Research International*, *109*, 260-267.
- Xiong, W., Li, J., Li, B., & Wang, L. (2019). Physicochemical properties and interfacial dilatational rheological behavior at air-water interface of high intensity ultrasound modified ovalbumin: Effect of ionic strength. *Food Hydrocolloids*, *97*, 105210.
- Xiong, W., Wang, Y., Zhang, C., Wan, J., Shah, B. R., Pei, Y., ... & Li, B. (2016). High intensity ultrasound modified ovalbumin: Structure, interface and gelation properties. *Ultrasonics sonochemistry*, *31*, 302-309.
- Xiong, Y. L. (2018). Muscle proteins. In *Proteins in food processing* (pp. 127-148). Woodhead Publishing.
- Xu, H., Gunenc, A., & Hosseinian, F. (2021). Ultrasound affects physical and chemical properties of Jerusalem artichoke and chicory inulin. *Journal of Food Biochemistry*, e13934.
- Xu, X., Zhang, L., Yagoub, A. E. A., Yu, X., Ma, H., & Zhou, C. (2021). Effects of ultrasound, freeze-thaw pretreatments and drying methods on structure and functional properties of pectin during the processing of okra. *Food Hydrocolloids*, 106965.
- Xue, F., Li, C., & Wang, S. (2021). Effects of high-intensity ultrasound treatment on physiochemical properties of caseins-cyanidin-3-galactoside conjugates. *International Journal of Food Science & Technology*.
- Yadav, L., Bhatnagar, V., & Mudgal, V.D. (2014). High power ultrasound: An innovation in the food processing industry. *Food Science Research Journal*., *5*, 190-196.
- Yadegari, R. J., Kaya, E. E., & Vural, H. (2021). Thermal and microscopic properties and quality characteristics of low-fat frankfurters and emulsions produced with carboxymethyl cellulose, methyl cellulose and pectin. *Carpathian Journal of Food Science & Technology*, *13*(2).
- Yan, L., Liu, B., Liu, C., Qu, H., Zhang, Z., Luo, J., & Zheng, L. (2020). Preparation of cellulose with controlled molecular weight via ultrasonic treatment improves

- cholesterol-binding capacity. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(2), e14340.
- Yan, L., Yu, D., Liu, R., Jia, Y., Zhang, M., Wu, T., & Sui, W. (2021). Microstructure and meltdown properties of low-fat ice cream: Effects of microparticulated soy protein hydrolysate/xanthan gum (MSPH/XG) ratio and freezing time. *Journal of Food Engineering*, 291, 110291.
- Yang, K., Lin, R., Zhang, S., Zhao, X., Jiang, J., & Liu, Y. (2022). Ultrasound-modified interfacial properties and crystallization behavior of aerated emulsions fabricated with pH-shifting treated pea protein. *Food Chemistry*, 367, 130536.
- Yang, M., Zeng, Q., Wang, Y., Qin, J., Zheng, J., & Wa, W. (2021). Effect of ultrasound pretreatment on the physicochemical properties and simulated gastrointestinal digestibility of micellar casein concentrates. *LWT*, 136, 110319.
- Yang, W., Kong, X., Zheng, Y., Sun, W., Chen, S., Liu, D., ... & Ye, X. (2019). Controlled ultrasound treatments modify the morphology and physical properties of rice starch rather than the fine structure. *Ultrasonics sonochemistry*, 59, 104709.
- Yang, X., Li, A., Li, X., Sun, L., & Guo, Y. (2020). An overview of classifications, properties of food polysaccharides and their links to applications in improving food textures. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 1-15.
- Yanjun, S., Jianhang, C., Shuwen, Z., Hongjuan, L., Jing, L., Lu, L., ... & Jiaping, L. (2014). Effect of power ultrasound pre-treatment on the physical and functional properties of reconstituted milk protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, 124, 11-18.
- Yao, Y., Pan, Y., & Liu, S. (2020). Power ultrasound and its applications: A state-of-the-art review. *Ultrasonics sonochemistry*, 62, 104722.
- Yao, Y., Sun, Z., Li, X., Tang, Z., Li, X., Morrell, J. J., ... & Luo, Z. (2022). Effects of Raw Material Source on the Properties of CMC Composite Films. *Polymers*, 14(1), 32.
- Yashini, M., Sunil, C. K., Sahana, S., Hemanth, S. D., Chidanand, D. V., & Rawson, A. (2019). Protein-based fat replacers—a review of recent advances. *Food Reviews International*.
- Yasui, K. (2018). Acoustic cavitation. In *Acoustic Cavitation and Bubble Dynamics* (pp. 1-35). Springer, Cham.

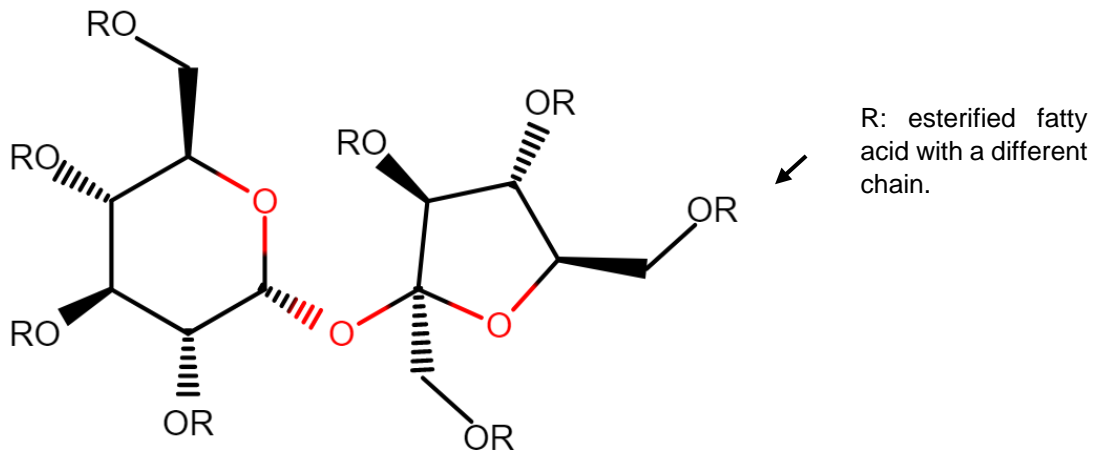
- Yasui, K. (2018b). Bubble Dynamics. In *Acoustic Cavitation and Bubble Dynamics* (pp. 37-97). Springer, Cham.
- Yaver, E., & Bilgiçli, N. (2021). Effect of ultrasonicated lupin flour and resistant starch (type 4) on the physical and chemical properties of pasta. *Food Chemistry*, 357, 129758.
- Yazici, F., & Akgun, A. (2004). Effect of some protein based fat replacers on physical, chemical, textural, and sensory properties of strained yoghurt. *Journal of Food Engineering*, 62(3), 245-254.
- Ye, A. (2011). Functional properties of milk protein concentrates: Emulsifying properties, adsorption and stability of emulsions. *International Dairy Journal*, 21(1), 14-20.
- Yeo, E. J., Kim, H. W., Hwang, K. E., Song, D. H., Kim, Y. J., Ham, Y. K., ... & Kim, C. J. (2014). Effect of duck feet gelatin on physicochemical, textural, and sensory properties of low-fat frankfurters. *Korean journal for food science of animal resources*, 34(4), 415.
- Yin, M., Yang, D., Lai, S., & Yang, H. (2021). Rheological properties of xanthan-modified fish gelatin and its potential to replace mammalian gelatin in low-fat stirred yogurt. *LWT*, 147, 111643.
- Yoo, S. S., Kook, S. H., Park, S. Y., Shim, J. H., & Chin, K. B. (2007). Physicochemical characteristics, textural properties and volatile compounds in comminuted sausages as affected by various fat levels and fat replacers. *International Journal of Food Science & Technology*, 42(9), 1114-1122.
- Yu, Z. L., Zeng, W. C., Zhang, W. H., Liao, X. P., & Shi, B. (2016). Effect of ultrasonic pretreatment on kinetics of gelatin hydrolysis by collagenase and its mechanism. *Ultrasonics sonochemistry*, 29, 495-501.
- Yu, Z., Su, Y., Zhang, Y., Zhu, P., Mei, Z., Zhou, X., & Yu, H. (2021). Potential use of ultrasound to promote fermentation, maturation, and properties of fermented foods: A review. *Food Chemistry*, 129805.
- Yuan, S., Li, C., Zhang, Y., Yu, H., Xie, Y., Guo, Y., & Yao, W. (2021). Ultrasound as an emerging technology for the elimination of chemical contaminants in food: A review. *Trends in Food Science & Technology*.
- Zalazar, C. A., Zalazar, C. S., Bernal, S., Bertola, N., Bevilacqua, A., & Zaritzky, N. (2002). Effect of moisture level and fat replacer on physicochemical, rheological

- and sensory properties of low fat soft cheeses. *International Dairy Journal*, 12(1), 45-50.
- Zam, W. (2020). Structured lipids: Synthesis, health effects, and nutraceutical applications. In *Lipids and Edible Oils* (pp. 289-327). Academic Press.
- Zambrano, F., Despinoy, P., Ormenese, R. C. S. C., & Faria, E. V. (2004). The use of guar and xanthan gums in the production of 'light' low fat cakes. *International journal of food science & technology*, 39(9), 959-966.
- Zbikowska, A., Kowalska, M., & Pieniowska, J. (2018). Assessment of shortcrust biscuits with reduced fat content of microcrystalline cellulose and psyllium as fat replacements. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(8), e13675.
- Żbikowska, A., Kupiec, M., Szymanska, I., Osytek, K., Kowalska, M., Marciniak-Lukasiak, K., & Rutkowska, J. (2020). Microbial  $\beta$ -glucan Incorporated into Muffins: Impact on Quality of the Batter and Baked Products. *Agriculture*, 10(4), 126.
- Zeece, M. (2020). *Food additives. Introduction to the Chemistry of Food*, 251–311.
- Zendeboodi, F., Farahnaky, A., & Gholian, M. M. (2019). Structural changes and stress relaxation behavior of  $\kappa$ -carrageenan cold-processed gels: Effects of ultrasonication time and power. *Journal of texture studies*, 50(6), 465-473.
- Zhang, H., Chen, G., Liu, M., Mei, X., Yu, Q., & Kan, J. (2020). Effects of multi-frequency ultrasound on physicochemical properties, structural characteristics of gluten protein and the quality of noodle. *Ultrasonics sonochemistry*, 67, 105135.
- Zhang, H., Chen, J., Li, J., Wei, C., Ye, X., Shi, J., & Chen, S. (2018). Pectin from citrus canning wastewater as potential fat replacer in ice cream. *Molecules*, 23(4), 925.
- Zhang, H., Zhang, F., & Yuan, R. (2020). Applications of natural polymer-based hydrogels in the food industry. In *Hydrogels based on natural polymers* (pp. 357-410). Elsevier.
- Zhang, M. F., Qin, Y. H., Ma, J. Y., Yang, L., Wu, Z. K., Wang, T. L., ... & Wang, C. W. (2016). Depolymerization of microcrystalline cellulose by the combination of ultrasound and Fenton reagent. *Ultrasonics sonochemistry*, 31, 404-408.
- Zhang, R., Luo, L., Yang, Z., Ashokkumar, M., & Hemar, Y. (2021). Formation of by High Power Ultrasound Aggregated Emulsions Stabilised with Milk Protein Concentrate (MPC). *Available at SSRN 3936342*.

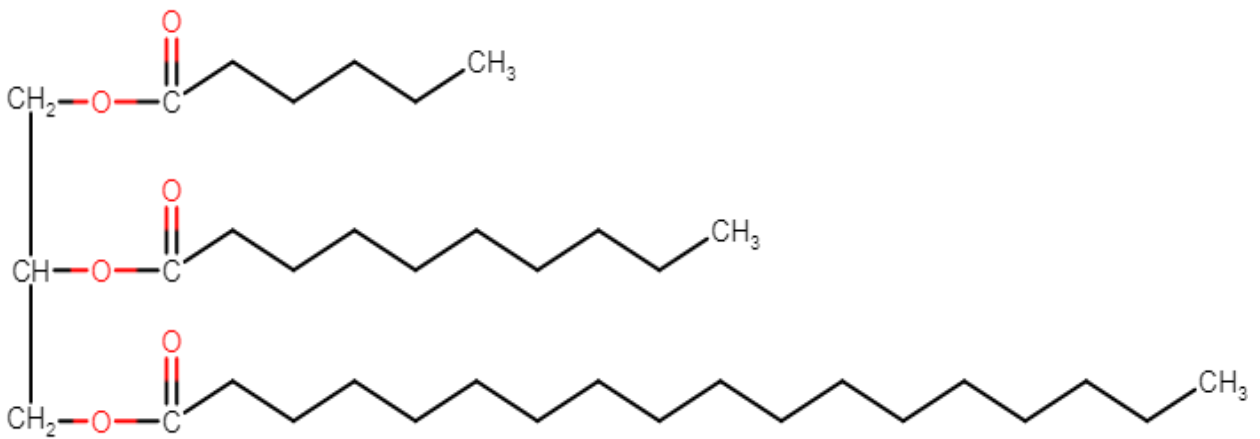
- Zhang, R., Ma, S., Li, L., Zhang, M., Tian, S., Wang, D., ... & Wang, X. (2021). Comprehensive utilization of corn starch processing by-products: A review. *Grain & Oil Science and Technology*.
- Zhang, R., Pang, X., Lu, J., Liu, L., Zhang, S., & Lv, J. (2018). Effect of high intensity ultrasound pretreatment on functional and structural properties of micellar casein concentrates. *Ultrasonics sonochemistry*, 47, 10-16.
- Zhang, T., Dou, W., Zhang, X., Zhao, Y., Zhang, Y., Jiang, L., & Sui, X. (2021). The development history and recent updates on soy protein-based meat alternatives. *Trends in Food Science & Technology*.
- Zhang, T., Zhao, Y., Tian, X., Liu, J., Ye, H., & Shen, X. (2021). Effect of ultrasound pretreatment on structural, physicochemical, rheological and gelation properties of transglutaminase cross-linked whey protein soluble aggregates. *Ultrasonics Sonochemistry*, 74, 105553.
- Zhao, C., Yin, H., Yan, J., Niu, X., Qi, B., & Liu, J. (2021). Structure and acid-induced gelation properties of soy protein isolate–maltodextrin glycation conjugates with ultrasonic pretreatment. *Food Hydrocolloids*, 112, 106278.
- Zhao, F., Liu, X., Ding, X., Dong, H., & Wang, W. (2019). Effects of high-intensity ultrasound pretreatment on structure, properties, and enzymolysis of soy protein isolate. *Molecules*, 24(20), 3637.
- Zhao, H., Shen, C., Wu, Z., Zhang, Z., & Xu, C. (2020). Comparison of wheat, soybean, rice, and pea protein properties for effective applications in food products. *Journal of food biochemistry*, 44(4), e13157.
- Zheng, T., Li, X., Taha, A., Wei, Y., Hu, T., Fatamorgana, P. B., ... & Hu, H. (2019). Effect of high intensity ultrasound on the structure and physicochemical properties of soy protein isolates produced by different denaturation methods. *Food Hydrocolloids*, 97, 105216.
- Zheng, Y., Zheng, M., Ma, Z., Xin, B., Guo, R., & Xu, X. (2015). *Sugar Fatty Acid Esters*. *Polar Lipids*, 215–243.
- Zheng, Z., Huang, Q., Luo, X., Xiao, Y., Cai, W., & Ma, H. (2019). Effects and mechanisms of ultrasound-and alkali-assisted enzymolysis on production of water-soluble yeast  $\beta$ -glucan. *Bioresource technology*, 273, 394-403.
- Zhou, C., Hu, J., Yu, X., Yagoub, A. E. A., Zhang, Y., Ma, H., ... & Otu, P. N. Y. (2017). Heat and/or ultrasound pretreatments motivated enzymolysis of corn gluten meal: Hydrolysis kinetics and protein structure. *Lwt*, 77, 488-496.

- Zhou, G., Liu, J., Wang, G., Wang, L., Zhang, A., Wang, Y., & Wang, X. (2019). Effect of Ultrasonic Treatment on Freeze-thaw Stability of Soy Protein Isolate Gel. *Journal of oleo science*, ess19167.
- Zhou, K., Slavin, M., Lutterodt, H., Whent, M., Eskin, N. M., & Yu, L. (2013). Cereals and legumes. In *Biochemistry of foods* (pp. 3-48). Academic Press.
- Zhou, L., Zhang, J., Xing, L., & Zhang, W. (2021). Applications and effects of ultrasound assisted emulsification in the production of food emulsions: A review. *Trends in Food Science & Technology*.
- Zhou, T., Zhao, Y., Wu, X., Wang, W., & Liu, A. (2018). Production of squid emulsion sausages using pork skin and coconut powder mixture as fat replacers. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(3), 747-754.
- Zhu, Z., He, J., Liu, G., Barba, F. J., Koubaa, M., Ding, L., ... & Vorobiev, E. (2016). Recent insights for the green recovery of inulin from plant food materials using non-conventional extraction technologies: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 1-9.

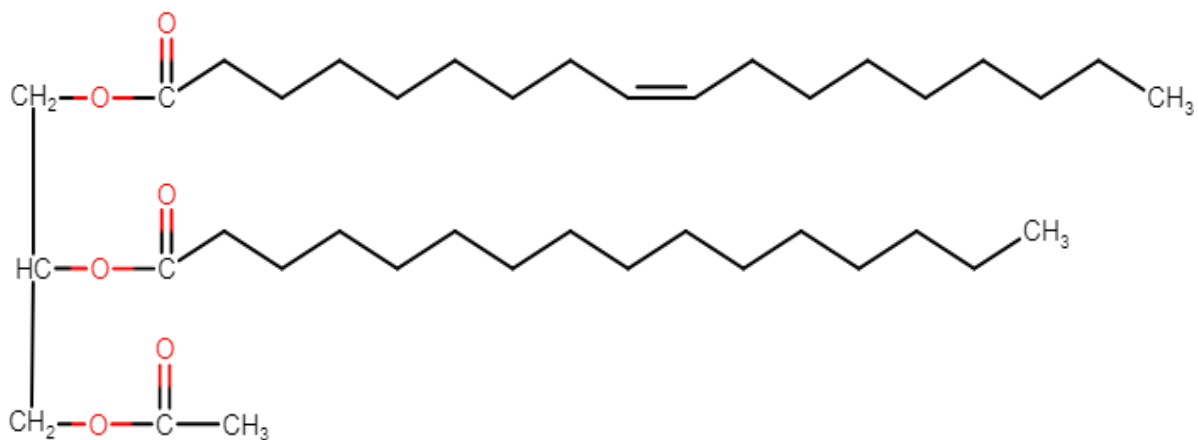
## 9. Figuras



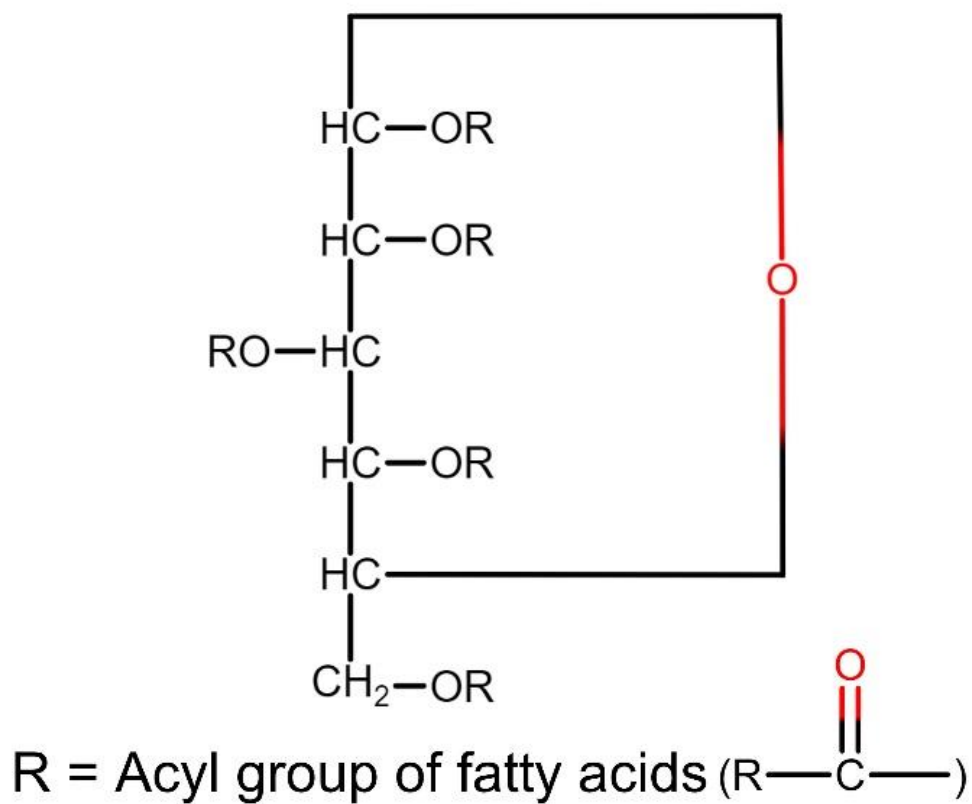
**Figure 1.** Structure of sucrose polyester (Olestra or Olean)



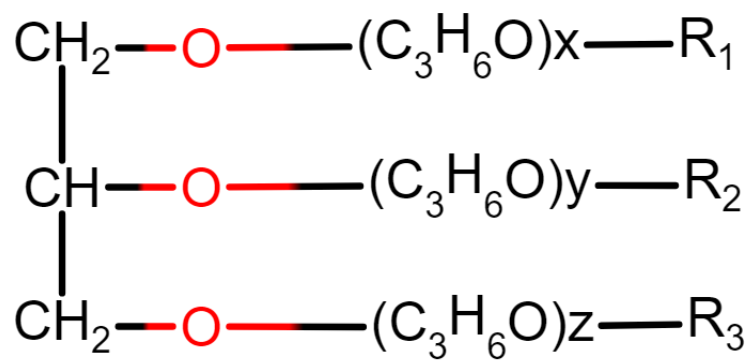
**Figure 2.** Caprenin structure (caprocapylobehenic triacylglycerol)



**Figure 3.** Molecular structure of salatrim

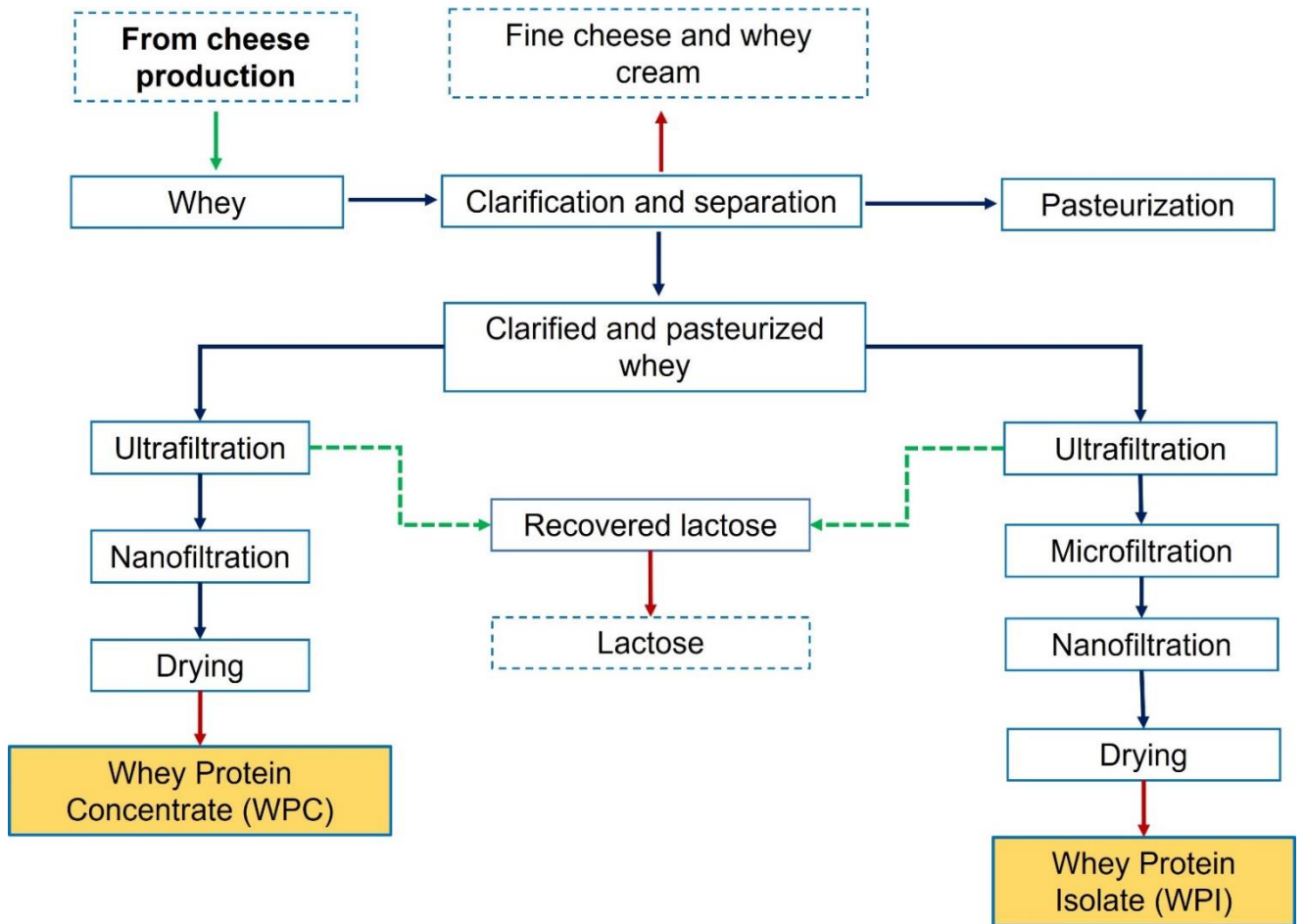


**Figure 4.** Molecular Structure of Sorbestrin (sorbitol polyester)

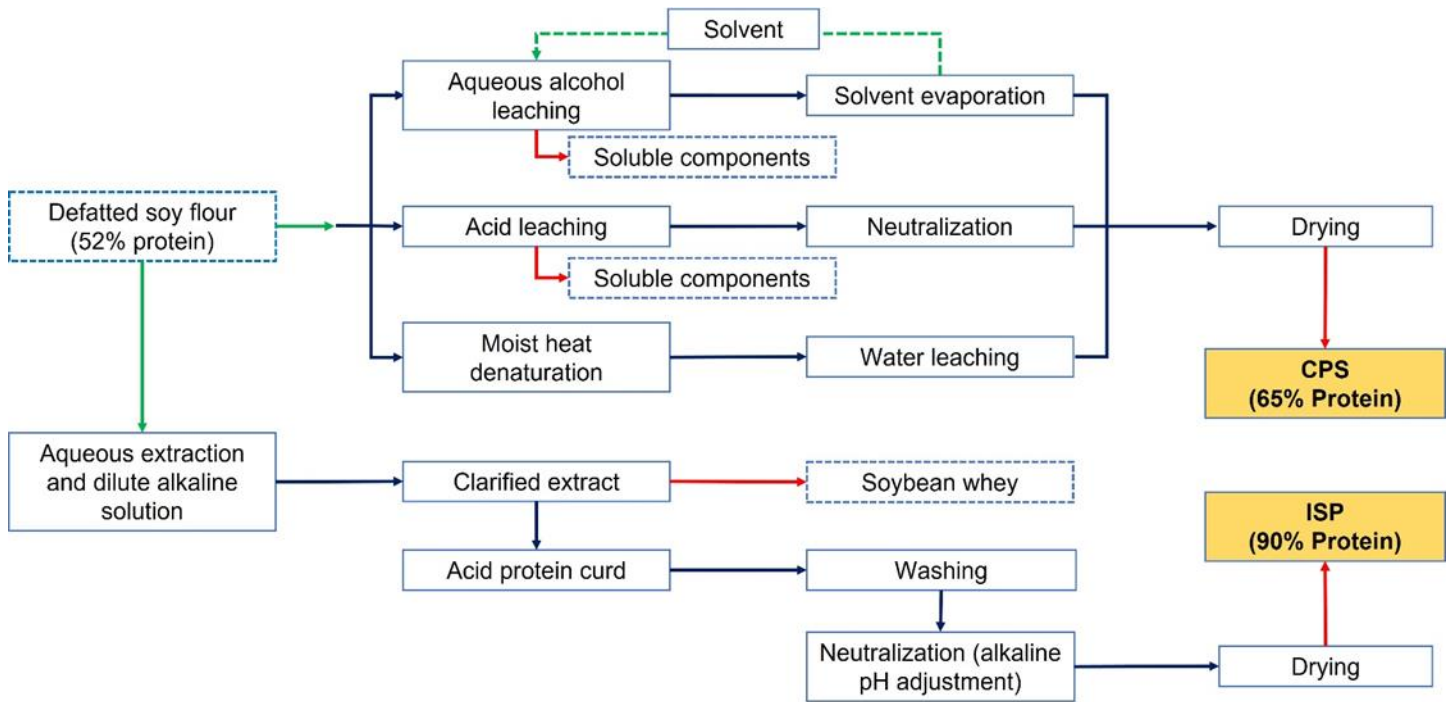


R1, R2, R3: aliphatic acyl  
groups of 4-23 carbons  
x, y, z= 1-7

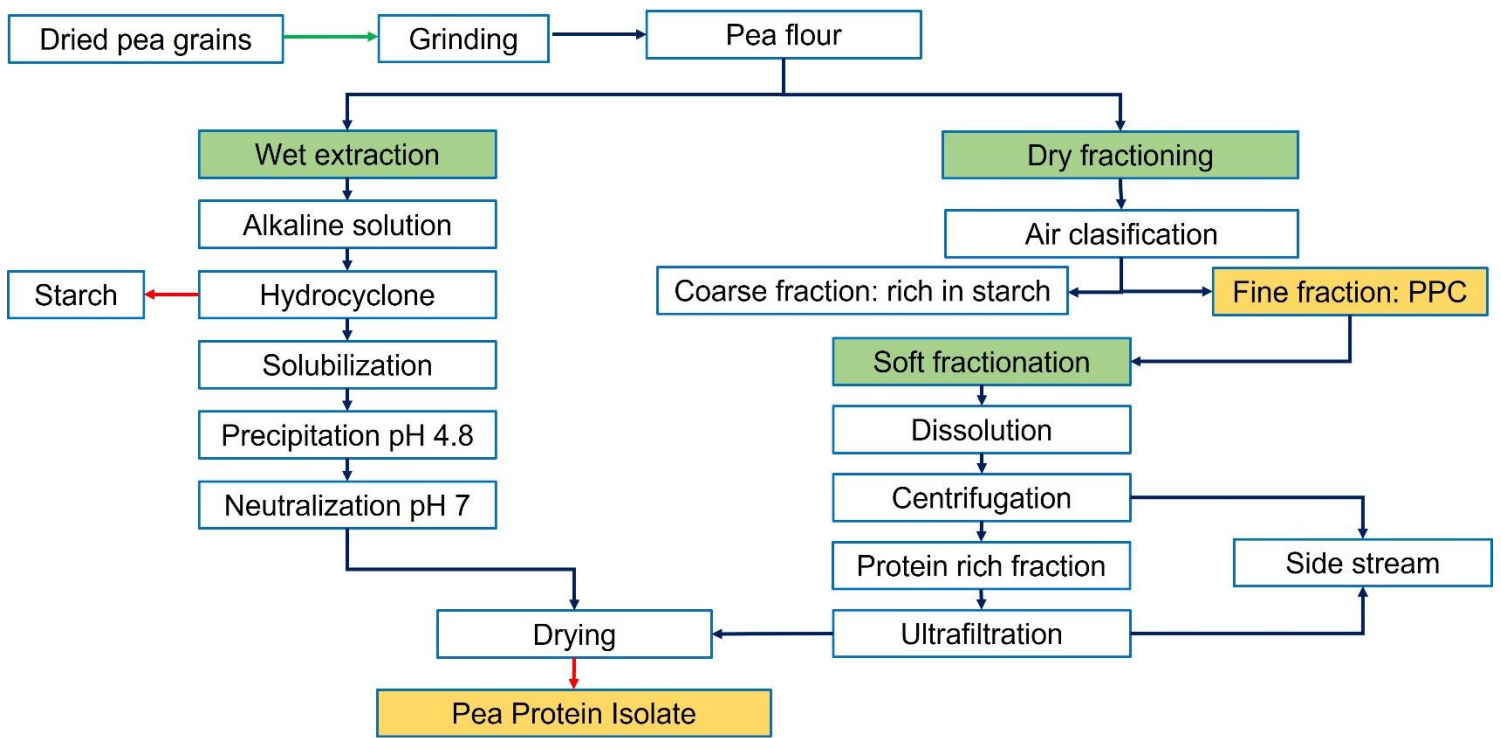
**Figure 5.** Molecular structure of esterified propoxylated glycerol (EPG)



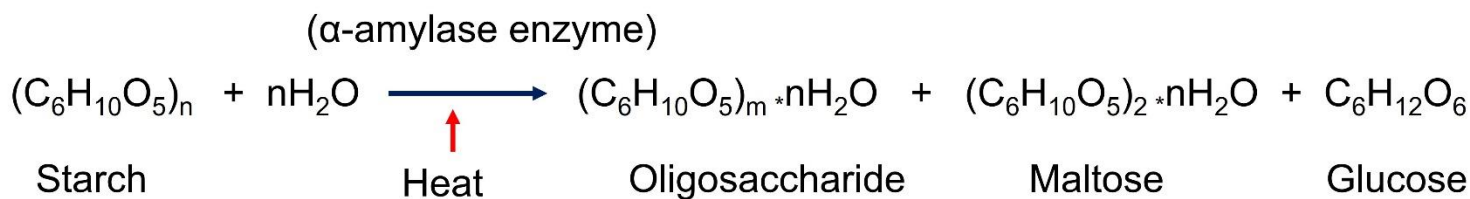
**Figure 6.** General processing steps for producing WPC and WPI



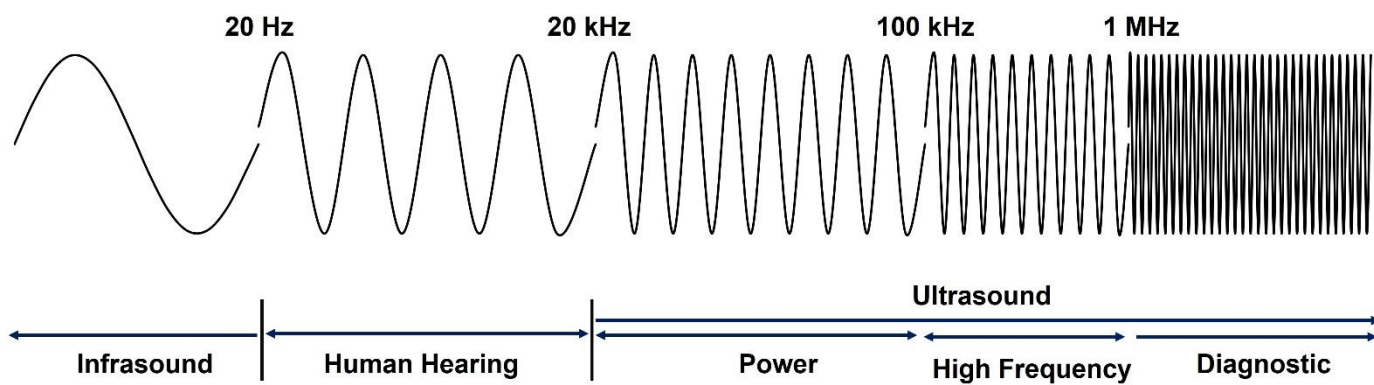
**Figure 7.** General processing steps for producing CPS and ISP



**Figure 8.** Pea protein extraction methods



**Figure 9.** Enzymatic hydrolysis of starch



**Figure 10.** Approximate frequency ranges of sound waves

## 10. Tablas

**Table 1.** Main functions of fats in various foods

<b>Food</b>	<b>Function</b>	<b>Reference</b>
Chocolate and confectionary	Contributes to flavor, color, melt, gloss, snap. Improves mold release. Prevents blooming and flavor release.	Talbot, 2015; Talbot, 2014
Ice cream	Promotes flavor, color, and mouthfeel. Stabilizes the mixture, improves density, and contributes to a smooth texture. After homogenization, it contributes to stabilizing the air present against coalescence and the consequent collapse of the ice cream.	Akbari et al.,2019; Ipsen, 2017; Smith 2015;
Bakery products	Improves lubrication, aeration, dough heat transfer, softness, mouthfeel, and structure.	Gutiérrez-Luna, K. et al., 2020; Colla, K. et al., 2018; Wassell, 2014
Meat products	Reduces cook loss, provides emulsion stability. Provides flavor, improved mouthfeel, and contributes to juiciness. Responsible for heat distribution during cooking. Contributes to product gloss, opacity, and browning.	Kumar, 2021; Sikorski & Sinkiewicz, 2010; Shand, 1997
Cream	Improved viscosity	Nguyen et al., 2020
Yogurt	Provides desirable texture, higher viscosity, low syneresis, and desirable mouthfeel. Improves flavor.	Fang et., 2019
Cookies	Responsible for soft and crisp texture, and provides flavor, lubrication, mouthfeel, aeration, and taste.	O'Sullivan, 2017

Mayonnaise	Contributes to texture, appearance, creaminess, palatability, flavor, and shelf life. Improves emulsion stability.	Mirzanajafi-Zanjani, 2019
Cheeses	Provides desirable sensory properties, including mouthfeel, texture, and flavor. Contributes to softness as fat is evenly distributed within the casein matrix.	Mattice & Marangoni 2019; Farkye & Guinee, 2017
Cheese crema	Contributes to smoothness, creaminess, astringency, and spreadability. Reduces lump formation and friction coefficient.	Ningtyas et al., 2017
Sauces and dressings	Provides emulsion stability. Improves the flavor profile and provides a creamy mouthfeel.	Chung et al., 2016
Margarine	Fat crystallization provides consistency, texture, spreadability, color, appearance, flavor, mouthfeel, and emulsion stability.	O'Brien, 2008

**Table 2.** Role of the main fat-based fat replacers in various foods

Fat substitute	Function	Use	Reference
Olestra (Olean)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Improves aroma retention</li> <li>Provides mouthfeel, lubricity</li> <li>Works as a flavor carrier</li> </ul>	Soups, sauces, salad dressings	Elangkovan & Ganapathy, 2020; Zam, 2020; O'Sullivan, 2016; Zheng, et al., 2015; Akoh, 2007; Omayma & Youssef, 2007
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Provides flavor, body, and mouthfeel</li> <li>Acts as a texturizer and stabilizer</li> <li>Decreases caloric content</li> </ul>	Dairy products	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acts as a texturizer</li> <li>It adds flavor and crunchiness</li> <li>Improves heat conduction. It is thermolabile</li> </ul>	Fried and baked goods. Reduced-fat extruded snacks	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Improves spreadability and plasticity</li> <li>It favors the formation of the emulsion and provides flavor</li> </ul>	Margarine, shortening, spreadable butter	
Caprenin	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simulates the functional properties of cocoa butter</li> <li>Helps to emulsify, stabilize, texturize and lubricate</li> <li>Acts as a flavor carrier</li> </ul>	Sweets and soft candies containing chocolates, cookies, coatings for dried fruits	Baruah & Bhattacharyya, 2017
Salatrim	<ul style="list-style-type: none"> <li>Provides flavor, texture, and stability.</li> <li>In mozzarella cheese reduces hardness and</li> </ul>	Dairy products	Khanal & Bansal, 2020; Zam, 2020; Rudan, 1998

	increases moisture content and proteolysis		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acts as an emulsifying and flavoring agent.</li> <li>• Helps dough conditioning</li> </ul>	Baked goods	Zam, 2020; Baruah & Bhattacharyya, 2017
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• It acts as an emulsifying and flavoring agent</li> <li>• Provides mouthfeel and lubricity</li> </ul>	Dressings and sauces	Zam, 2020
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides hardness and appearance</li> </ul>	Chocolate-flavored coatings	Zam, 2020
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides texture and flavor</li> <li>• Used as an alternative to cocoa butter</li> </ul>	Confectionery products	Zam, 2020; da Silva Lannes & do Amaral, 2015
Sorbestrin	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thermolabile compound</li> <li>• Reduces calorie content</li> </ul>	Baked goods, fried foods, margarine, frozen desserts, salad dressings	Shahidi et al., 2020
EPG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thermolabile compound</li> <li>• Adaptable melting point</li> <li>• Provides flavor</li> <li>• Contributes to the formation of flavors</li> <li>• Improves mouthfeel, texture, and appearance</li> <li>• Reduces calorie content</li> </ul>	Baked goods, cooking oils, salad dressings, ice cream, mayonnaise, shortenings, chocolate products, and ingredients, hard candies, spreads, cooking oil	Khanal & Bansal, 2020. Shahidi et al., 2020; Chavan et al., 2016; Bechtel, 2014; Artz et al., 2007; Chung & Min, 2004; Artz, 1999; Mahungu, et al., 1999

**Table 3.** Main functions of animal proteins as fat replacers in different food categories

Function	Use	Reference
<b>Milk protein concentrate: MPC</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Imitates the morphological properties of fat droplets in emulsions</li> <li>• Improves flavor</li> </ul>	Soups and sauces; meat products	USDEC, 2021; Patel et al., 2014
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Higher yield</li> <li>• Increases fusion capacity</li> </ul>	Pasta filata cheeses, reduced-fat Cheddar, and Mozzarella	Omrani et al., 2020; Rehman et al., 2003; Caro et al., 2011; Francolino et al., 2010
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acts as a stabilizing and texturizing agent</li> <li>• Retains moisture</li> <li>• Improves flavor, mouthfeel, smoothness, and firmness</li> <li>• Provides higher viscosity to the mix</li> <li>• Shorter freezing curves</li> <li>• Reduces calorie content</li> </ul>	Ice cream	Akbari et al., 2019; Mostafavi et al., 2017; Patel et al., 2006; Álvarez et al., 2005; Mahdian & Karazhian, 2013
<b>Micellar casein concentrate: MCC</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides higher protein content</li> <li>• Improves storage stability due to its heat stability</li> <li>• Only 1.5-2% fat is used</li> <li>• Lower calorie content</li> <li>• Provides a milk-like mouthfeel</li> <li>• Reduces the use of fat (1.5-2%)</li> </ul>	Beverages	Hammam et al., 2021; USDEC, 2021
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides thermal stability</li> <li>• Improves viscosity and water retention</li> </ul>	Soups and sauces	Hammam et al., 2021; USDEC, 2021
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases firmness of the gel</li> <li>• Reduces syneresis</li> <li>• In Greek yogurt, it improves physical and rheological</li> </ul>	Yogurt	Hammam et al., 2021; Bong et al., 2014

properties and increases the acidification rate		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves performance and consistency</li> <li>• The emulsifying capacity contributes to a better binding of fat and water</li> <li>• Increases yield</li> <li>• Releases proteins for gel formation</li> </ul>	Meat products	Hammam et al., 2021; Salunke, 2013
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves the fat-water bonding</li> <li>• Improves physical and sensory characteristics</li> <li>• Improves the yield</li> <li>• Firmer structures</li> </ul>	Cheeses	Xia et al., 2021; Hammam et al., 2021; Hammam & Metzger, 2020; Lu et al., 2016; Amelia et al., 2013; Amelia & Barbano, 2013
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides body and texture</li> </ul>	Ice cream	Hammam et al., 2021; Rakes & Laaman, 2010
<b>Simplesse®</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides freeze/thaw stability</li> <li>• Improves creaminess and facilitates aeration and stability</li> </ul>	Ice cream and other desserts (low and fat deducted)	Akbari et al., 2019; Kelly, 2019; Ipsen, 2017
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases fusion and fluidity in Gouda cheeses</li> <li>• Increases the shine in powdered cheese and decreases the apparent viscosity</li> <li>• Reduces fat content by 40%, improves texture, and improves sensory properties in low-fat petit-Suisse cheese</li> <li>• Increases yield and water content in Cheddar Cheese</li> <li>• Provides tenderness</li> <li>• Increases performance</li> <li>• Contributes to the uniform distribution of the water load throughout the casein matrix</li> </ul>	Low and reduced-fat cheese	CP Kelco, 2021; Kew et al., 2020; Sánchez-Obando et al., 2020; Uргу et al., 2019; Kelly, 2019; Ipsen, 2017

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides greater firmness and adhesiveness</li> <li>• Increases. the viscosity in Greek yogurts</li> <li>• Provides creaminess. Improves texture</li> <li>• Promotes interaction with other proteins to give the gel strength and greater water retention capacity</li> </ul>	Yogurt and acidified products	CP Kelco, 2021; Hossain et al., 2020; Patel et al., 2020; Kelly, 2019; Torres et al., 2018; Ipsen, 2017; Sandoval-Castilla et al., 2004
<ul style="list-style-type: none"> <li>• The consistency and size of the microparticles adds mouthfeel and creaminess</li> <li>• Improves light scattering by adding opacity without the negative impacts of grease</li> <li>• Decreases viscosity</li> </ul>	Low-fat beverages (Dairy-based, smoothies, cream-based liqueurs, lattes)	CP Kelco, 2021
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides rheological properties and lightness to emulsions</li> <li>• Increases viscosity</li> <li>• Provides stability to the emulsion</li> <li>• Contributes to water/juice binding</li> </ul>	Sauces, salad dressings	Nasrollahzadeh et al., 2021; Harper et al., 2020; Chung et al., 2014
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides a clean base on which to build a good cream flavor</li> <li>• Provides viscosity, mouthfeel, and flavor</li> </ul>	Creams	CP Kelco, 2021
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintains rheological properties.</li> <li>• Improves microstructure and film thickness</li> </ul>	Low-fat frostings	Ipsen, 2017; Meza et al., 2016
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases the nutritional profile</li> <li>• Reduces caloric content</li> <li>• Decreases hardness and weight</li> </ul>	Baked products	Nasrollahzadeh et al., 2021; Harper et al., 2020; Colla et al., 2018
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves texture and sensory characteristics</li> <li>• Increases graininess, stickiness, color, fat, juiciness, and smoke, texture analysis correlated with sensory scores</li> </ul>	Sausages	Kwon et al., 2021 Kerry & Kerry, 2006

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces the loss due to cooking.</li> <li>• Improves emulsion stability, firmness, and chewiness in low-fat sausages (WPI)</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases water and oil holding capacities</li> <li>• Reduces hardness.</li> <li>• Reduces caloric load</li> <li>• Provides color</li> </ul>	Meat products	Eisinaite et al., 2017; Yoo et al., 2007
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves texture and storage stability</li> <li>• Prevents coalescence and flocculation of emulsion droplets.</li> <li>• Reduce calorie content by 52-55%</li> <li>• Contributes to the sensory profile</li> </ul>	Mayonnaise	Venus et al., 2021; Kew et al., 2020; Sun et al., 2018; Cheung et al., 2002
<b>Dairy-Lo</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides mouthfeel and texture.</li> </ul>	Baked products	Chavan et al., 2016
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases viscosity</li> <li>• Contributes to the smell and taste</li> <li>• Increases water retention and stretching capacities in Mozzarella cheese</li> <li>• Reduces caloric content.</li> <li>• Maintains palatability and consistency</li> </ul>	Cheese	Lai et al., 2020; O'Sullivan, 2020; Kelly, 2019; Tahereh et al., 2017; Ertekin & Guzel-Seydim, 2010; Zalazar et al., 2002
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves taste and appearance</li> <li>• Decreases viscosity</li> <li>• Contributes to the mouthfeel</li> </ul>	Yogurt	Yashini et al., 2019; Kelly, 2019; Yazici & Akgun, 2004
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contribute to flavor and texture</li> </ul>	Ice cream	Kelly, 2019; Prindiville et al., 2000
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Texturizes, provides mouthfeel</li> <li>• Improves water binding and viscosity</li> </ul>	Mayonnaise and salad dressings Frostings	Kumar et al., 2018
<b>Collagen</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases water retention capacity (81.5%)</li> </ul>	Sausages and cold cuts	Araújo et al., 2021; Nasrollahzadeh et al.,

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controls and reduces the effects of lipid oxidation</li> <li>• Reduces cooking time and cooking loss; improves stability after cooking</li> <li>• Improves hardness and chewiness</li> <li>• Cuts up to 50% fat without changing quality; reduces the caloric value</li> <li>• Increases ash, moisture, protein content (up to 43%)</li> <li>• Increases emulsion stability</li> <li>• Maintains sensory properties</li> </ul>		2021 Kumar, 2021; Araújo et al., 2019; Hjelm et al., 2019; Olanwanit & Rojanakorn, 2019; Xiong, 2018; Zhou et al., 2018; Carvalho et al., 2017; Sousa et al., 2017; dos Santos Alves et al., 2016; Ham et al., 2016; Kim et al., 2015; Petridis et al., 2014; Ham et al., 2013; Tarté, 2011; Kerry & Kerry, 2006
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Higher protein, lower fat contents</li> <li>• Reduces water loss. increases performance, improves texture</li> <li>• Increased juiciness and texture</li> <li>• Improves sensory acceptance</li> <li>• Reduces cooking loss</li> </ul>	Hamburger meat	Nasrollahzadeh et al., 2021; Kumar, 2021; Al-Nawassrah & Al-Abdullah, 2020; Santos, et al., 2020; Alexandretti et al., 2019; Ibrahim et al., 2018; Kim et al., 2018; Carvalho et al., 2017
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases creaminess and spreadability</li> <li>• Maintains water activity and sensory characteristics</li> <li>• Increases thixotropy, hardness, apparent and plastic viscosity</li> <li>• Replaces up to 30% fat</li> </ul>	Bitter chocolate	Godoi et al., 2021; Nasrollahzadeh et al., 2021; Yashini et al., 2019; Neyestani-Mohammad & Mohammadifar, 2014
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides creaminess and smoothness</li> </ul>	Dairy beverages	Godoi et al., 2021
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces syneresis</li> </ul>	Ham	Prestes, 2012
<b>Gelatin</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases gel firmness, water activity, protein content</li> <li>• Reduces up to 8% fat</li> </ul>	Confectionery Dairy products Cream	Hosseini Shekarabi et al., 2021; Yashini et al., 2019

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves texture and sensory properties</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enhances emulsion stability</li> <li>• Provides greater toughness and adhesiveness</li> <li>• Improves texture due to a denser gel structure in the oilwater emulsion</li> <li>• Reduces caloric content</li> </ul>	Mayonnaise	Ataie et al., 2021
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves creaminess and smoothness</li> <li>• Increases mouthfeel</li> </ul>	Low-fat dairy beverages	Godoi et al., 2021
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases firmness, water retention capacity, and viscosity (Gelatin-anionic polysaccharide)</li> <li>• Increases system lubrication</li> <li>• Reduces syneresis</li> <li>• Increases gel strength, viscosity, and water holding capacity</li> <li>• Acts as a stabilizing agent</li> <li>• Melt-in-mouth property provides fat-like sensory perception</li> <li>• Maintains textural and sensory properties</li> </ul>	Yogurt	Huang et al., 2021; Yin et al., 2021; Yashini et al., 2019; Pang et al., 2017; Pancar et al., 2016; Pang et al., 2015; Tavakolipour et al., 2014
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases viscosity and cooking performance</li> <li>• Maintains juiciness, tenderness, and general acceptance</li> <li>• Produces a denser, more stable, structure</li> <li>• Reduces cooking loss</li> <li>• Improves gumminess and cohesiveness</li> </ul>	Sausages and cold cuts	Kim et al., 2020; Lee & Chin, 2017; Lee & Chin 2016; Yeo et al. 2014
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Decreases fat content</li> <li>• Increases melting time and viscosity before and after cooling</li> <li>• Provides flavor and mouthfeel</li> </ul>	Soft ice cream	Hartono, 2019; Schrieber & Gareis, 2007

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases proteolysis degree, due to a greater discontinuity of the casein network and the open spaces created by the added emulsion droplets</li> <li>• Provides a smoother and less Gumminess texture</li> <li>• Provides firmness</li> <li>• Improves the stability of emulsion droplets to flocculation and coalescence during processing and storage</li> <li>• Increases spherical fat droplets</li> </ul>	Low Fat Cheddar Cheese	Anvari & Joyner, 2019; Yashini et al., 2019; Anvari, & Joyner, 2018; Schrieber & Gareis, 2007
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves texture, reduces toughness and chewiness in meatballs</li> <li>• Reduces toughness, gumminess, and chewiness of chicken meat for hamburger</li> <li>• Increases protein content.</li> <li>• Acts as a stabilizing agent at different temperatures</li> <li>• Increases performance per cooking</li> <li>• Reduces the loss of fat and water due to its gelling capacity</li> </ul>	Meat products	Niu et al., 2020; Serdaroğlu, et al., 2017; Serdaroğlu et al., 2016
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Immobilizes water or serum avoiding syneresis</li> <li>• Improves consistency and texture</li> <li>• Acts as an emulsifier and stabilizer; length and consistency</li> </ul>	Margarine	Schrieber & Gareis, 2007
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides an elastic gel texture, mouthfeel</li> <li>• Emulsion stabilizing agent.</li> </ul>	Low-fat spreads	Karim & Bhat, 2008; Schrieber & Gareis, 2007
<b>Egg White Protein (EWP)</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases water retention capacity and performance</li> <li>• The protein content is higher</li> </ul>	Meat products	Cheng et al., 2021; Kumar, 2021; Öztürk et al., 2017; Yoo et al., 2007

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces fat content (4.04-11.54%)</li> <li>• Increased the content of mono and polyunsaturated fatty acids and decreased saturated fatty acids</li> <li>• Increases storage stability</li> <li>• Meatball filling: This had high water retention and adequate texture and rheological properties</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides storage stability</li> <li>• Reduces fat content (substitution up to 30%)</li> <li>• EWP-Pectin: higher viscosity and hardness, the resistance decreases, the yellow color increases</li> <li>• Acts as a natural inhibitor of lipid oxidation</li> </ul>	Mayonnaise	Alavi & Chen, 2021; Xiao et al. 2021; Kew et al., 2020; Kobayashi et al., 2017; Mirzanajafi-Zanjani et al., 2019; Chang et al., 2017; Wang et al., 2015
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Color</li> <li>• Lubrication</li> </ul>	Salad dressing Spreadable cream	Alavi & Chen, 2021; Kew et al., 2020; Liu et al., 2018
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduce caloric content</li> <li>• Improves texture and mouthfeel</li> <li>• Decreases crystal formation</li> </ul>	Ice cream, butter, margarine, yogurt	López-Martínez et al., 2021; Zeece, 2020; O'Sullivan, 2017

**Table 4.** The average composition of MPC, MPI, MCCs, WPCs and WPI

<b>Composition (%)</b>	<b>MPC</b>	<b>MPI</b>	<b>MCC80</b>	<b>MCC85</b>	<b>MCC90</b>	<b>WPC34</b>	<b>WPC80</b>	<b>WPI</b>
Protein	39.5-84.5	89.5	79.5	84.5	89.5	34-36	80-82	90-92
Fats	1.25-2.5	< 2.5	3.0	3.0	3.0	3-4.5	4-8	0.5-1
Lactose	8-52	5	10.0	3.0	1.0	48-52	4-8	0.5-1
Ash	8-10	8	8.0	8.0	8.0	6.5-8	3-4	2-3
Moisture	5-6	< 6	6.0	6.0	7.0	3-4.5	3.5-4.5	4-5

(USDEC,2021; ADPI, 2021)

**Table 5.** Chemical composition of egg yolk and egg white

<b>Component</b>	<b>Yolk</b>		<b>White</b>	
Water	50		88	
Lipids	31-35		0.2	
Proteins	31-35		0.2	
	Lipovitellins	36	Ovalbumin	54
	Livetinas	38	Ovotransferrin	12
	Phosvitine	8	Ovomucoid	11
	LDL	17	Lysozyme	3.4
		Other proteins	19.6	
Ash	1		0.8	

**Table 6.** Main functions of plant-based protein fat replacers in different food groups

Function	Applications	Reference
<b>Soy protein</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces caloric content</li> <li>• Increases resistance to fusion</li> <li>• Provides good textural properties</li> <li>• Exhibits significantly higher elasticity, chewiness, cohesion, and elasticity values due to decreased adhesiveness</li> <li>• Increases protein content</li> <li>• Increases foaming capacity</li> <li>• Higher resistance to melting, smaller ice crystals, and less ice crystal growth after heat shock</li> <li>• Mimics creamy sensation</li> <li>• Helps disperse other polymeric components and ice crystals</li> <li>• Increases viscosity and hardness</li> <li>• Produces a darker color</li> </ul>	Ice cream	Yan et al., 2021; Akbari et al., 2019; Chen et al., 2019; Guo et al., 2018; Liu et al., 2018; Nishinari, 2018; Akesowan, 2009
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increase protein content, moisture, and yield in regional Mexican Oaxaca and Panela-type cheese</li> <li>• Reduces fat content, provides a harder texture</li> <li>• Soy and carrageenan added to Oaxaca cheese provide a smoother and stickier texture during melting</li> </ul>	Cheese	Yashini et al., 2019; Rojas-Nery et al., 2015; Rinaldoni et al., 2014;
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves emulsion</li> <li>• Good extenders and binders</li> <li>• Reduces moisture, fat, and cholesterol contents</li> <li>• Provides aroma</li> <li>• Reduce the cooking loss</li> <li>• Avoid stale flavors</li> <li>• Increases tenderness, juiciness, and cooking performance</li> <li>• Increases moisture retention</li> <li>• Improves textural properties</li> </ul>	Meat products	Shahbazi et al., 2021; Yashini et al., 2019; McArdle & Hamill, 2011

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves nutritional properties by increasing protein content</li> <li>• Increases thermal stability</li> <li>• Reduces the plastic texture of low-fat sausages by hindering protein-protein interactions</li> <li>• Provides better cooking performance and texture</li> <li>• Increase performance, reduce production costs</li> </ul>	Sausages	de Souza Paglarini et al., 2021; Panea & Ripoll, 2021; de Souza Paglarini et al., 2019; Yashini et al., 2019; Sun et al., 2017; McArdle & Hamill, 2011
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides higher viscosity, storage modulus and loss modulus, and an easier gelling characteristic</li> </ul>	Cream	Sun et al., 2015
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides higher porosity and less hardness.</li> <li>• Increases water content, water activity, volume, elasticity, cohesiveness, chewiness</li> <li>• Increases in L* values, but a negative effect on hardness, and a* and b* color values</li> <li>• Fat content can be reduced up to 63%</li> </ul>	Bakery products	Azmoon et al., 2021; Bazrafshan et al., 2015
<b>Maize protein</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Decreases functional properties (appearance and color) and apparent viscosity</li> <li>• Increases in moisture content, protein, carbohydrates</li> <li>• Decreases fat content; substitutes up to 40% fat in mayonnaise</li> </ul>	Mayonnaise, salad dressings, and sauces	Shi et al., 2021; Yashini et al., 2019; Gu et al., 2016; Ali et al., 2015
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improvements in spreading properties</li> <li>• Slows down lipid oxidation (combined with <math>\beta</math>-carotene)</li> <li>• Decreases the presence of trans and saturated fatty acids</li> <li>• When applied to cakes, reduces fat by 60%, preserving its textural properties</li> </ul>	Margarine	Glusac et al., 2018; Chen et al., 2016
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partially replaces butter (20%)</li> <li>• Maintains texture and color</li> </ul>	Baked goods	Feng et al., 2020; Colla et al., 2018

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces saturated and total fat content</li> <li>• Maintains texture, rheology, and melting-stretching qualities in cheese.</li> <li>• Increases viscosity, reduces production costs</li> <li>• Increases solubility</li> </ul>	Dairy products	Glusac & Fishman, 2021; Mattice et al., 2020
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avoids rancidity</li> <li>• Decreases caloric content</li> <li>• Increases protein content</li> <li>• Decreases moisture content, lost during heating</li> </ul>	Confectionery, glazes	Yashini et al., 2019; Lawton, 2002
<b>Wheat protein (Gluten)</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintains sensory and rheological properties intact</li> <li>• Increases thermal stability</li> </ul>	Mayonnaise, salad dressings	Yashini et al., 2019; Liu et al., 2018
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintains sensory properties and color</li> <li>• Increases binding properties and smoothness</li> <li>• In sausages, it provides a smooth texture</li> <li>• Acts as an extender and filler, improves emulsion stability</li> <li>• Minimizes loss from cooking</li> </ul>	Meat products	Kamani et al., 2019; Serdaroglu & Ozsumer, 2003
<b>Pea protein</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces shrinkage and improves texture</li> <li>• Reduces fat content and caloric value</li> <li>• Higher stability and cooking performance</li> <li>• Changes in texture (soft, sticky), color (lightness, yellowness)</li> <li>• Increases water content, protein, and dietary fiber</li> <li>• In sausages a 15% fat substitution is achieved</li> <li>• Improves retention of guide</li> <li>• Contributes to higher chewiness and toughness values</li> </ul>	Meat products	Colomer Sellas et al., 2021; Öztürk-Kerimoğlu, 2021; Pietrasik & Soladoye, 2021; Shahiri Tabarestani & Mazaheri Tehrani, 2014; Pietrasik & Janz, 2010; Su et al., 2000
<ul style="list-style-type: none"> <li>• In desserts, it maintains flavor and creaminess</li> <li>• In cheeses, it confers structure and smooth texture</li> </ul>	Dairy products	Ouyang et al., 2021; Tanger et al., 2021

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confers physicochemical properties like animal origin proteins</li> <li>• Reduces cholesterol content</li> <li>• Contributes to dispersibility</li> </ul>	Mayonnaise Dressings	Ma & Boye, 2013
<b>Lupin protein</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Decreases volume and lightness</li> <li>• Increases resistance to breakage, dough consistency, water activity, water content</li> <li>• Decreases sweetness</li> <li>• Provides firmness, dryness, increases chewing time</li> <li>• Replaces about 30-40% fat in cookies</li> </ul>	Bakery products	Colla et al., 2018; Van de Noort, 2017; Forker et al., 2012
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases protein solubility, water retention capacity, and oil binding.</li> <li>• Contributes to emulsion formation</li> <li>• Replaces 4-8% fat if mixed with some polysaccharide</li> <li>• Provides emulsion stability</li> </ul>	Mayonnaise and salad dressings	Yashini et al., 2019; Muranyi et al., 2016; Papalamprou et al., 2006; Raymundo et al., 2002
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases dietary fiber content, increases fat reduction (7.91%)</li> <li>• Improves emulsion stability, decreases cooking loss</li> <li>• Produces smooth textures, higher adhesiveness</li> </ul>	Sausages	Leonard et al., 2019

**Table 7.** Composition of different types of soy protein products

<b>Component (%)</b>	<b>Whole soy flour</b>	<b>Defatted soy flour</b>	<b>SPC<sup>1</sup></b>	<b>SPI<sup>2</sup></b>
Moisture	3.4	6.5	9.0	4.8
Protein	41.0	53.0	65.3	92.0
Fat	22.5	5.1	0.3	-
Fiber	1.7	3.0	2.9	0.25
Ash	5.1	6.0	4.7	4.0

1. Soy Protein Concentrate

2. Soy Protein Isolate

**Table 8.** Most important functions of polysaccharide-based fat replacers in food products

Polysaccharide	Function	Use	Reference
<b>Gums</b>			
<b>Xanthan</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retains moisture, slow down bread staling,</li> <li>• Reduces volume and elasticity</li> <li>• Increases density</li> <li>• Could replace 25-100% fat</li> </ul>	Baked products	Colla et al., 2018; Ognean et al., 2006; Zambrano et al., 2004
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produce bigger globules in emulsion</li> <li>• Provides emulsion stability in acid media and flow control</li> <li>• Improves adherence and suspension of solid particles</li> <li>• Stabilizes droplets against coalescence</li> </ul>	Mayonnaise and salad dressings	Rahmati et al., 2015; Ma & Boye, 2013
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases emulsion stability</li> <li>• Improved cooking yield</li> <li>• Improved water holding capacity</li> </ul>	Meat products	Rather et al., 2016
<b>Carrageenan</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases viscosity, provides mouthfeel and texture</li> <li>• Provides body, viscosity, and stability to emulsions</li> </ul>	Sauces, salad dressings, mayonnaise	Zhang et al., 2020; Ognean et al., 2006
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces cooking loss and weight loss during storage</li> <li>• Better gelling capacity</li> <li>• Increases texture, color, and flavor scores in sensory evaluation</li> </ul>	Sausages	Chen et al., 2021; Atashkar et al., 2018; Cierach et al., 2009

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• In fermented sausages: Reduces moisture loss, water activity and increases pH, chewiness, and appearance (40% fat substitution)</li> </ul>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases moisture content and yield</li> <li>• Reduces fat content</li> <li>• Increases hardness, but reduces cohesiveness and elasticity</li> </ul>	Fresh and ripened cheeses	Wang et al., 2016; Rojas-Neri et al., 2015
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces cholesterol and fat contents</li> <li>• Better moisture retention</li> <li>• Provides improved juiciness and softness</li> <li>• Increase pH, cooking yield, and emulsion stability</li> <li>• Higher sensory scores in appearance and flavor; particle size and shape resemble those of fat droplets</li> </ul>	Meat products	Das et al., 2015; Nayak et al., 2015
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases viscosity</li> <li>• Reduce caloric content</li> <li>• Improves foam stability</li> </ul>	Whipped cream	Ghribi et al., 2021
<b>Locust bean gum</b> <b>Gum arabic</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Act as a thickening agent</li> <li>• Provides better mouthfeel</li> <li>• Increases viscosity</li> </ul>	Sauces and salad dressings	O’Sullivan, 2016; Ognean et al., 2006
	<p>In yogurt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Act as a stabilizing and gelling agent</li> <li>• Reduces syneresis</li> <li>• Improves body and texture</li> </ul>	Dairy products	Mugo et al., 2020; Lafta et al., 2019

	<p>In cheeses</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves compressibility and elasticity</li> </ul>		
<b>Pectin</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces penetration distance and volume</li> <li>• Increases product weight, water activity, moisture content, and hardness</li> <li>• Reduces sensory acceptability and flavor and mouthfeel scores</li> </ul>	Bakery products	Colla et al., 2018
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduction of elasticity, cohesiveness</li> <li>• Improves color</li> </ul>	Meat products (sausages)	Wongkaew et al., 2020
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increase in viscosity, overrun, and hardness</li> <li>• Slow down melting</li> <li>• Help maintaining appearance and flavor</li> <li>• Sensorywise, high scores in smoothness, a low score in mouthfeel</li> </ul>	Ice cream	Zhang et al., 2018
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides mouthfeel and viscosity</li> <li>• Provides viscosity and smoothness</li> <li>• Increases shelf stability</li> <li>• Promotes flocculation extension</li> </ul>	Sauces and salad dressings	Maneerat et al., 2017; Chavan et al., 2016; O'Sullivan, 2016
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces pseudoplastic behavior, thixotropic area, and viscosity index</li> <li>• Increases resistance to deformation</li> </ul>	Mayonnaise	Ishwarya & Nisha, 2021; Sun et al., 2018

	<ul style="list-style-type: none"> <li>•When used in combination with proteins, could reduce fat up to 60% de fat preventing coalescence and flocculation of emulsion droplets</li> </ul>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Improves firmness and bioactivity</li> <li>•Reduces syneresis because of protein-pectin interactions</li> <li>•Improves gel elasticity (<math>G' &gt; G''</math>)</li> <li>•Improved gelling force</li> </ul>	Yogurt	Khubber et al., 2021; Baron et al., 2020
<b>Starches and their derivatives</b>			
<b>Native starch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Contributes to product texture and water holding</li> <li>•Act as a gelling and thickening agent</li> <li>•Reduces loaf hardness, volume, and height</li> </ul>	Margarine, spreads, salad dressings, sauces, bakery products	Colla et al., 2018; Moriano et al., 2018; Peng & Yao, 2017; Ognean et al., 2006
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Increases viscosity, water holding capacity</li> <li>•Provides stability during storage</li> <li>•Reduces fat content</li> <li>•Reduces syneresis and improves rheological properties</li> <li>•Contributes to gel formation</li> </ul>	Dairy products	Diamantino et al., 2019; Lobato-Calleros et al., 2014
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Modifies product texture</li> <li>•Contributes to gel formation</li> <li>•Acts as stabilizing and thickening agent</li> </ul>	Ice cream	Sun & Fang, 2021; Akbari et al., 2019

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases product stability</li> <li>• Decreases viscosity, firmness, and apparent cohesiveness</li> <li>• Increases adherence</li> </ul>	Mayonnaise	Werlang et al., 2021
<b>Modified starches</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases viscosity, water holding capacity</li> <li>• Reduces gelling temperature and retrogradation tendency</li> <li>• Improved swelling power</li> <li>• Improves thermomechanical resistance</li> </ul>	Cheeses	Diamantino et al., 2019
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Replaces up to 90% of fat</li> <li>• Reduces viscosity</li> <li>• Confers shelf stability</li> </ul>	Salad dressings	Sun & Fang, 2021; Klaochanpong et al., 2017
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides a smoother texture</li> <li>• Reduces final viscosity, retrogradation, gel hardness, and gumminess.</li> <li>• Act as a thickening and stabilizing agent</li> <li>• Reduces oil droplet size</li> <li>• Confers stability in freeze/thaw cycles and storage at high temperature</li> <li>• Could replace up to 80% of fat</li> </ul>	Mayonnaise	Werlang et al., 2021; Bajaj et al., 2019; Rahmati et al., 2015; Teklehaimanot et al., 2013
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enhances hardness</li> <li>• Provides stability</li> <li>• Contributes to foam formation</li> </ul>	Ice cream	Shenana, 2021; Kale et al., 2020; Babu et al., 2018

	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Increases firmness and freeze/thaw stability</li> <li>•Reduces whipping time</li> <li>•Increases foam stability</li> <li>•Replaces up to 62% fat</li> <li>•Improves water holding capacity</li> </ul>	Dairy products	Iftikhar & Dutta, 2020; Bagheri et al., 2018
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Improves in dough stability and development time</li> <li>•Increases viscosity and hardness</li> <li>•No effect on weight loss, specific volume and moisture content of crumbs</li> </ul>	Bakery products	Rodriguez-Sandoval et al., 2017; Serinyel & Öztürk, 2017
<b>Maltodextrins</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Increases viscosity and water retention</li> <li>•No significant modifications in composition (total solids, proteins, ashes)</li> <li>•Improves mouthfeel (smoothness)</li> <li>•Melting resistance</li> </ul>	Ice cream	Abbas et al., 2021; Ateteallah et al., 2020; Akbari et al., 2019; Khan et al., 2018; de Souza Fernandes et al., 2017
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Provides mouthfeel, body, and viscosity</li> <li>•Improves water holding capacity</li> </ul>	Salad dressings	O'Sullivan, 2016
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduces up to 50% fat</li> <li>•Allows cost reduction</li> <li>•Improves sensory properties and product texture</li> </ul>	Cheese	Nazari et al., 2020
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduces fat content</li> <li>•Increases water holding capacity</li> </ul>	Meat and dairy products	Peng & Yao, 2017; Chavan et al., 2016

	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Contributes to smooth mouthfeel</li> <li>•Act as a bulking agent</li> <li>•Provides body and mouth-coating properties in liquids foods</li> </ul>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduces volume and resistance</li> <li>•Increases dough consistency, water activity, moisture, cohesiveness, and chewiness</li> <li>•Limits overall acceptability (muffins) Contributes to product mouthfeel</li> <li>•Can replace up to 100% fat</li> </ul>	Bakery products	Gutiérrez-Luna et al., 2020; Colla et al., 2018
<b>Polydextrose</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Provides volume, creaminess, smoothness, and mouthfeel</li> </ul>	Desserts and ice cream mixes	Peng & Yao, 2017; Veena et al., 2015
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Improves water holding capacity, sensory and textural attributes</li> <li>•Increases culture viability</li> <li>•Reduces syneresis</li> <li>•Increases apparent viscosity</li> <li>•Reduces pH after 21 d of refrigerated storage</li> </ul>	Buffalo milk yogurt	Hamdy et al., 2021; Huang et al., 2020
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Improves smoothness and fat-related mouthfeel</li> <li>•Helps retain moisture</li> <li>•Modifies texture.</li> <li>•Acts as a bulking and texturizing agent</li> <li>•Reduces fat content</li> </ul>	Sauces and salad dressings, Confectionery products, and spreads	Chavan et al., 2016; O'Sullivan, 2016

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acts as bulking, texturizing agent; reduces fat content</li> </ul>	Ice cream	Akbari et al., 2019
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Could replace up to 50% of fat in cookies</li> <li>• Increases hardness, fracturability, water activity</li> <li>• Reduces dispersion ratio</li> <li>• Reduces 35 % fat and 28.25% of calories</li> </ul>	Bakery products	Aggarwal et al., 2018; Colla et al., 2018; Moriano et al., 2018
<b>Cellulose and derivatives</b>			
<b>Cellulose</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides emulsion stability</li> <li>• Reduces fat content and cooking losses</li> <li>• Increases hardness, chewiness, and gumminess</li> <li>• Increases moisture content, induces no protein loss</li> </ul>	Sausages	Choe & Kim, 2019; de Oliveira Faria et al., 2015
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promotes emulsion stability</li> <li>• Reduce up to 50% fat</li> <li>• Provides firmness and hardness</li> <li>• Reduces weight loss during storage</li> <li>• Increases b* color parameter</li> </ul>	Meat products	Schmiele et al., 2015
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces fat in fried dough coatings and donuts</li> <li>• Increases volume in bakery products as it stabilizes air bubbles and minimizes contraction after cooking</li> <li>• Increases dough viscoelasticity</li> </ul>	Fried and baked products	Xie et al., 2021; Jung & Song, 2019

<b>Microcrystalline cellulose (MCC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides body, consistency, and mouthfeel</li> <li>• Stabilizes las emulsions and foams</li> <li>• Controls syneresis</li> <li>• Augments viscosity, shine, and opacity in selected products</li> </ul>	Ice cream and desserts, salad dressings and sauces, and dairy products	Peng & Yao, 2017; O'Sullivan, 2016
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides creaminess</li> <li>• Increases water retention</li> <li>• Increases average weight, hardness, maximum cutting force in cookies</li> </ul>	Desserts, ice creams, bakery products, and sauces	Jung & Song, 2019; Zbikowska et al., 2018
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weakens protein network</li> <li>• Increases lactic acid bacteria counts, improves hardness and chewiness in fermented sausages</li> </ul>	Meat products	Dos Santos et al., 2021
<b>Carboxymethyl cellulose (CMC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces meltability, chewiness; increases melting time in cheese</li> <li>• Improves apparent viscosity, firmness, fluffiness; increases particle size in cream</li> </ul>	Dairy products	Rezvani et al., 2020; Chatli et al., 2019; Salari et al., 2017
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases post-cooking water retention</li> <li>• Produces changes in hardness, cohesiveness, and chewiness</li> <li>• Improves cooking yield and juiciness</li> <li>• Reduces elasticity and gumminess</li> </ul>	Meat products	Guedes-Oliveira et al., 2019; Barekati et al., 2018

<b>Methylcellulose (MC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides creaminess and lubricity</li> <li>• Helps trap air</li> <li>• Retains moisture</li> </ul>	Bakery products	Sanz et al., 2017
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Act as a stabilizing agent</li> <li>• Provides body to emulsions and foams</li> </ul>	Sauces, salad dressings, dairy products	Jung & Song, 2019
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduce fat content up to 50%</li> <li>• Provides juiciness and softer texture</li> <li>• Mouthfeel like fat</li> <li>• Increases yield</li> <li>• Act as a binder and bulking agent</li> </ul>	Meat products	Yadegari et al., 2021; Husak et al., 2018; Gibis et al., 2015
<b>Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves flow behavior, texture, appearance, and sensory characteristics</li> </ul>	Sauces, mayonnaise, salad dressings	Jung & Song, 2019; Ma & Boye, 2013
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases firmness and shear force</li> <li>• Improved oxidation resistance</li> <li>• Reduces saturated and unsaturated fat contents</li> </ul>	Meat products	Oh et al., 2019
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves creaminess, appearance, smoothness, and moisty mouthfeel</li> </ul>	Desserts	Borreani et al., 2020; Borreani et al., 2017
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases moisture content, hardness, and resistance</li> <li>• Reduces overall sensory acceptability</li> </ul>	Bakery products	Ren et al., 2020; Lee, 2018; Tanti et al., 2016; Laguna et al., 2014

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Replaces up to 50% shortening</li> <li>• Reduces dough viscosity</li> <li>• Increases stiffness in cookie cream</li> </ul>		
<b>Fibers</b>			
<b>Inulin</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces saturated fat content</li> <li>• Increases moisture content</li> <li>• Reduces hardness, cohesiveness, gumminess, and fibrosity</li> <li>• Provides higher elasticity and chewiness scores (at 25% substitution)</li> <li>• Increases luminosity</li> </ul>	Sausages	<p>de Souza Paglarini et al., 2021; dos Santos et al., 2020; Souza et al., 2019; Alaei et al., 2018; Salajeghehet al., 2018</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desserts</li> <li>• Improved sensory acceptability</li> <li>• Reduces syneresis</li> <li>• Improves microstructure and rheological characteristics</li> <li>• Cheeses</li> <li>• No reported changes in firmness, adhesivity, and cohesiveness</li> <li>• Reduces hardness and gumminess</li> <li>• Improves mouthfeel, creaminess</li> <li>• Increases yield</li> <li>• Yogurt</li> <li>• Exhibits higher spontaneous syneresis without affecting water holding capacity</li> </ul>	Dairy products	<p>Anderson-Dekkers et al., 2021; Sulejmani et al., 2021; Arango et al., 2020; El-Kholy et al., 2020; Schädle et al., 2020; Borges et al., 2019; Furlán et al., 2017; Karimi et al., 2015; Sołowiej et al., 2015</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increase in acidification rate, storage modulus, and gel firmness</li> <li>• Increases mouthfeel and creaminess</li> </ul>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases firmness, viscosity, and melting rate</li> <li>• Reduces fat content up to 2.30%</li> <li>• Improves mouthfeel, creaminess, heat shock stability</li> <li>• Reduces adhesivity and hardness</li> </ul>	Ice cream	Samakradha-mrongthai et al., 2021; Ateteallah et al., 2020; Akbari et al., 2016
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces water activity and volume</li> <li>• Increases resistance, dough consistency, moisture, firmness, and elasticity</li> <li>• Increases shelf life in cookies</li> <li>• Reduces oily sensation in muffins</li> <li>• Increases chewiness, adhesivity, elasticity</li> <li>• Replaces 10-100% fat</li> </ul>	Bakery products	Anderson-Dekkers et al., 2021; Paciulli et al., 2020; Ren et al., 2020; Colla et al., 2018; Laguna et al., 2014

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides juiciness and softness</li> <li>• Increases fiber content</li> <li>• Produces higher b values in tristimulus color parameters</li> <li>• Could replace up to 50% fat, increases viscosity</li> </ul>	Meat products (salami, patties)	Bis-Souza et al., 2021; Paglarini et al., 2020; Furlán et al., 2014
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves spreadability, mouthfeel</li> <li>• Replaces 5-80% fat</li> <li>• Masks bitter/acid flavors</li> <li>• Improves viscosity</li> </ul>	Spreads, mayonnaise	Anderson-Dekkers et al., 2021
<b>Beta-glucan</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adds body and texture</li> <li>• Replaces up to 40% fat</li> <li>• Reduces elasticity</li> </ul>	Bakery products	Żbikowska et al., 2020; Colla et al., 2018
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves viscoelastic properties</li> <li>• Provides emulsion stability before and during storage</li> <li>• Replaces up to 50% fat</li> </ul>	Mayonnaise	Avramia & Amariei, 2021; da Silva Araújo et al., 2014; Worrasinchai et al., 2006
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases hardness, cohesiveness, elasticity, and chewiness</li> <li>• Reinforces water holding and oil sorption capacities</li> <li>• Increases cooking yield</li> <li>• Provides softness and juiciness after cooking</li> <li>• Could replace 50-100% fat</li> </ul>	Meat products (Sausages, hamburger patties)	Fan et al., 2020; Mejía et al., 2019; Summo et al., 2020; Szpicer et al., 2020
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provides improved viscosity, firmness, and flavor</li> <li>• Enhances cohesiveness</li> </ul>	Cheeses	Ningtyas et al., 2019; Aydinol & Ozcan, 2018; Ningtyas et al., 2018

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces hardness and spreadability</li> </ul>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces syneresis</li> <li>• Improves formation of aromatic compounds</li> <li>• Increases viscosity</li> </ul>	Yogurt	Mishra et al., 2020; Elsanhoty & Ramadan, 2018; Lazaridou et al., 2014

**Table 9.** Most common gums used as fat mimetics: source and extraction methods

<b>Gum</b>	<b>Source</b>	<b>Extraction Method</b>	<b>References</b>
Pectin	Citrus peel Pomace of apples	Acid hydrolysis (high temperature)	Gerschenson et al., 2021: Gharibzahedi et al., 2019
Carrageenan	Red algae (Class <i>Rhodophyta</i> )	Sulfation	Jung & Song, 2019
Xanthan	Microbial polysaccharide ( <i>Xanthomonas campestris</i> )	Anaerobic fermentation	Riaz et al., 2021
Guar Carob tree	Galactomannan extracted from legume seeds	Grinding and precipitation with isopropanol	BeMiller, 2019; Mudgil et al., 2014
Gum arabic	Acacia tree	Dry exudation	Jung & Song, 2019

**Table 10.** Common commercial starches and their amylose /amylopectin proportions.

Source	Fractions	
	Amylose	Amylopectin
Corn	28	72
Potato	21	79
Wheat	28	72
Tapioca	17	83
Rice	15-35	65-85
Waxy maize	0	100

(Haq et al., 2019; Rahman & Hasan, 2019)

**Table 11.** Advantages and disadvantages of ultrasound applications in food products

Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Safe, no toxic compounds are generated <sup>a</sup></li> <li>• Green, eco-friendly technology</li> <li>• Easy to implement, low cost, efficient energy-wise <sup>a,d</sup></li> <li>• Used as a tool to improve food industrial operations, including processes such as extraction, thermal treatments, homogenization, mass transfer operation (freezing, drying) <sup>f</sup></li> <li>• Texture modulation in specific foodstuffs <sup>b</sup></li> <li>• Used as an analytical tool (Low-intensity ultrasound) <sup>e</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• US-induced mechanical effects such as shear strength could damage or inactivate released compounds<sup>g</sup></li> <li>• Produce free radicals capable of producing unwanted sensory, nutritional, nutraceutical, or technological properties of foods, thus affecting product quality <sup>a</sup></li> <li>• Possible lipid oxidation, inactivation of valuable and undesired protein denaturation <sup>h</sup></li> </ul>

<sup>a</sup> Khan et al., 2020; <sup>b</sup> Fu et al., 2020; <sup>c</sup> Bruno et al., 2019; <sup>d</sup> Zhao et al., 2019; <sup>e</sup> Khorshidi et al., 2019; <sup>f</sup> Wen et al., 2018; <sup>g</sup> Majid et al., 2015; <sup>h</sup> Awad et al., 2012

**Table 12.** Effects of ultrasound on structural and techno-functional properties of animal properties

Ultrasound treatment	Structural and techno-functional changes	References
<b>Milk proteins</b>		
MPC80 20 kHz 600 W 0,0.5, 1, 2 5 min Pulsed US (5 s on, 3s off) < 50 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces particle size from micro to nanoscale.</li> <li>• No changes in molecular weight of protein.</li> <li>• Increases solubility (35.78% to 88.30%) after 5 min</li> <li>• Increases emulsion stability index at 1 min</li> <li>• Increases storage modulus (G<sub>0</sub>).</li> <li>• Viscosity decreases</li> </ul>	Yanjun et al., 2014
MPI (0.1-3% p/p) 20 kHz (95%) 34 W/cm <sup>2</sup> 2 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces particle size (~150 nm)</li> <li>• Promotes aggregate formation (~20 μm).</li> <li>• Improves emulsifying properties: smaller droplet size; inhibits coalescence and flocculation</li> </ul>	O'Sullivan et al., 2015.
MPC70 (5% p/p) 20 kHz 14.4 W 3s	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases viscosity</li> <li>• Improves gelled emulsion formation</li> <li>• Modulates viscosity behavior and aggregation degree by adjusting ultrasonic energy</li> </ul>	Zhang et al., 2021
<b>Whey proteins</b>		
WPC 20 kHz 150 W 19.75 min 29°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exhibits a smaller particle size</li> <li>• Improved thermal stability and storage modulus</li> <li>• Reduces the amount of low molecular weight molecules.</li> </ul>	Khatkar, et al. 2018

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Shows a positive impact of changes in the secondary structure of proteins</li> <li>• Increases solubility</li> <li>• Forms more elastic, strong gels</li> </ul>	
<p>Casein: whey proteins (97:3, 80:20, 50:50) suspensions at 7.5% w/w concentration</p> <p>20 kHz, 20.8 W, 1, 2, and 3 min. pH 6.6-6.8. 30°C.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases particle size of aggregates</li> <li>• Reduces viscosity</li> <li>• US pretreated CN: WP reduces viscosity, improved gelling ability. At the 80:20 ratio, viscosity is increased.</li> <li>• Denser gels, except for 50:50 CN: WP</li> <li>• Combined heat/US treatments in casein-rich suspensions produced gels with similar microstructures to those of control.</li> </ul>	Leong, et al., 2018
<p>Preheated WPI (10% p/v, 85 °C, 30 min) kHz, 107 W/cm<sup>2</sup> for 5, 10, 20 and 40 min pH 7, 45 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces particle size.</li> <li>• Increases free sulfhydryl groups at the surface</li> <li>• Facilitates the formation of disulfide bonds during and after gelation</li> <li>• Increased water holding capacity, gel strength, and gel firmness(G')</li> </ul>	Shen, et al., (2017)
<p>WPI (100 g/L) 20 kHz, 20 and 40 min 0, 200, 400, 600 and 800 W Pulses: 3s on, 1s off 25 ± 2 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces particle size.</li> <li>• Increases free sulfhydryl groups</li> <li>• Maximum gel strength at 600 W, 40 min</li> <li>• Increases emulsion stability and antioxidant activity.</li> <li>• Reduces solubility and emulsifying activity</li> </ul>	Jiang et al., 2018

<p>WPI (5 mg/mL in sodium phosphate)</p> <p>20 kHz, 600 W, 10, 20, 30, and 40 min, pH 7, 3±1 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No changes in molecular weight</li> <li>• Alters secondary structure, reducing <math>\alpha</math> helix and <math>\beta</math> sheet structures, increasing <math>\beta</math> turn and random coil transitions</li> <li>• Increases surface hydrophobicity, reduces aggregate size. Improves foaming, emulsifying, and antioxidant properties</li> </ul>	<p>Meng et al., 2021</p>
<p>WPI (50 mg/mL)</p> <p>20 kHz, 120, 360 and 600 W, pH 3, 5, 7, 9 and 11, 30 min, 25 ± 2 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• At 600 W and all pHs (but 5), the number of <math>\beta</math> sheets and random coils increased.</li> <li>• Size distribution increases linearly with ultrasound intensity</li> <li>• Exhibits maximum hydrophobicity at 600 W, pH 11</li> <li>• Reduces turbidity at all pH levels, but pH 5</li> <li>• Improves emulsion stability and activity at pH 3-9</li> </ul>	<p>Gao et al., 2019</p>
<p>WPI</p> <p>20 kHz, 600 W (43 ± 3.4 W/ cm<sup>2</sup>, 30 min), 25 ± 2 °C, pH 2 and 11</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strongly pH dependent</li> <li>• Particle size distribution becomes narrower at both pH values</li> <li>• Maximum surface hydrophobicity and minimum turbidity at pH 11, but emulsifying properties are affected</li> <li>• Better emulsion stability at pH 2</li> </ul>	<p>Jiang et al., 2021</p>
<p>WPC80 5% (p/v)</p> <p>20 kHz 750 W 220V</p> <p>19.75 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces particle size (0,68 ± 0,23 <math>\mu</math>m)</li> <li>• Improved protein aggregation.</li> <li>• Increases thermal stability, coagulation time, solubility</li> </ul>	<p>Hamdy et al., 2018</p>

<p>WPC80 20 kHz 0-500 W 15 min Pulses: 2 s on, 2 s off &lt;25 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces activation energy (15.9%), enthalpy (16.8%) and entropy (16.4%)</li> <li>• Significantly increases free sulfhydryl content (43.7%) and surface hydrophobicity (62.6%)</li> <li>• Reduces <math>\alpha</math> helix, increases <math>\beta</math> sheet, <math>\beta</math> turn contents.</li> </ul>	<p>Wu et al., 2018</p>
<p>WPC 10 % (p/p) 20 kHz 550 W 0, 2.5, 5 and 7.5 min, 25-30 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases foam formation capacity and foam stability, gel hardness, and adhesivity at longer US times (7.5 min)</li> <li>• Reduces emulsifying capacity and syneresis.</li> </ul>	<p>Ahmadi et al., 2017</p>
<p>WPI – kappa carrageenan 24 kHz, 2 and 4 min 50 and 100% amplitude 25 <math>\pm</math> 2 °C.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changes in the secondary structure of the protein</li> <li>• Progressive reduction of particle size with treatment intensity</li> <li>• Induces electrostatic interactions, complex coacervation between carrageenan and WPI</li> <li>• Exhibits pseudoplastic behavior, viscosity changes</li> <li>• Increase in foam volume, stability, and expansion</li> <li>• Increase in emulsion stability</li> </ul>	<p>Vargas et al., 2021</p>
<p>WPI 40 kHz 600 W 111.1 W/L Pulses:10s on, 3s off 10, 20, 30, 60 and 90 min 25 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves hydrolysis degree and peptide yield</li> <li>• Structural changes in proteins</li> <li>• Increases particle size, free sulfhydryl groups, <math>\alpha</math>- helix and <math>\beta</math>-turns</li> <li>• Reduction of Z-potential, disulfide bonds, and <math>\beta</math>- sheets</li> </ul>	<p>Liang et al., 2021</p>

<p>WPI– Transglutaminase (10% p/v) 20kHz 69 w/cm<sup>2</sup> Pulses:10s on/ 5 s off, 10-40 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases number of polymers/ high molecular weight aggregates</li> <li>• Increases particle size and surface hydrophobicity</li> <li>• Increases transglutaminase-mediated cross-linking degree</li> <li>• Increased apparent viscosity, consistency index, water holding capacity, and gel resistance</li> </ul>	<p>Zhang et al., 2021</p>
<p><b>Micellar casein concentrate (MCC)</b></p>		
<p>MCC 20 kHz, 58 W/L Pulses: 3 s on, 2 s off 0, 0.5, 1, 2 and 5 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces in particle size</li> <li>• Changes in secondary structure</li> <li>• Increases surface hydrophobicity</li> <li>• Solubility increased with 5 min treatment</li> <li>• Improves conductivity solubility, emulsification, and gelation capacities</li> </ul>	<p>Zhang et al., 2018</p>
<p>MCC 20 kHz 3.1 W/mL 0-15 min 25 °C Pulses: 5s on and 1s off</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces particle size</li> <li>• Increases hydrophobicity.</li> <li>• After 6 min, both thermal stability and oil holding capacity decreases</li> <li>• Increases solubility a pH 4-8</li> </ul>	<p>Yang et al., 2021</p>
<p>MCP 20 kHz, 60 W Pulses: 30s on and 30s off 0.5, 1, 2.5 and 5 min, 30 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces particle size (from &gt; 30 μm to ~0,1 μm)</li> <li>• Increases solubility (&gt;95%)</li> </ul>	<p>Wu et al., 2020</p>
<p>MCC 20 kHz 453 W (50%) 18-246 J/mL, 5 – 60 min 20 ± 2 and 50 ± 2 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces particle size</li> <li>• Increases soluble calcium content, viscosity, and hydrophobicity at T&gt;20°C</li> </ul>	<p>Song et al., 2021</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves emulsifying activity index</li> </ul>	
<p>MCC (20% p/p) 50 % 10-second pulses 30 min 35 ± 5 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changes ternary and quaternary protein structure, causing aggregation and formation of small surface pores</li> <li>• Increases solubility (83.20%), Z-potential (29.72mV), water (2.81g/g DS) and oil holding (2.88 g/g DS), emulsifying (53.64%), and swelling (5.66 mL/g) capacities</li> </ul>	Lara-Castellanos et al., 2021
<p>MCC - cyanidin-3-galactoside (2g:0.04g) 400 W Pulses: 2 s on, 2 s off 20 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces free amino groups and sulfhydryl content</li> <li>• Promotes casein aggregation, increases particle size</li> <li>• Increases surface hydrophobicity, reduces thermal stability</li> <li>• Unfolds protein structure and exposes reactive groups</li> <li>• Improves emulsifying and gelling properties</li> </ul>	Xue et al., 2021
<b>Egg white protein (EWP)</b>		
<p>20 kHz 34-36 W/cm<sup>2</sup> 20min  20 kHz 45-48 W/cm<sup>2</sup> 40min  pH 7 1% w/v</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No changes in subunits and EWP secondary structure</li> <li>• Increases surface hydrophobicity and sulfhydryl free groups</li> <li>• Reduces net surface charge, changes particle size</li> <li>• Promotes protein aggregate formation</li> <li>• Increases foam formation capacity</li> <li>• Increases emulsifying activity</li> </ul>	Xiong, et al., 2016

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No changes in foam and emulsion formation and stability</li> <li>• Increases gelling temperature</li> </ul>	
<p>20 kHz, 34.11 ± 1.46 W, 2-14 min 25 °C, pH 7.6–8.6</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protein size reduces and WP solubility linearly improved (10% p/p, pH 8).</li> <li>• Foam capacity and stability augment as particle size diminishes</li> <li>• Emulsifying capacity increases with sonication time.</li> <li>• Acoustic cavitation releases lysozyme from the ovomucin network, breaking up electrostatic attraction</li> </ul>	Stefanović et al., 2017
<p>20 kHz 90, 120, 240, 360 and 480 W 10min &lt; 25 °C pH 7.5</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improved surface hydrophobicity</li> <li>• Breaks down covalent bonds; reduces particle size.</li> <li>• Degrades ovomucin, making it less water-soluble</li> <li>• Produces smaller aggregates and a porous protein structure</li> <li>• Increases solubility and reduces viscosity</li> <li>• At 360 W, foaming capacity increases 260 %</li> <li>• Solubility increases along with ultrasound power</li> </ul>	Sheng et al., 2018
<p>EWP 10 % 20 kHz 800 W 30% amplitude 15 min 25 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces particle size of protein via depolymerization</li> <li>• Increases surface charges and exposition of hydrophobic groups</li> <li>• Increases interfacial activity in peptides</li> <li>• Reduces interfacial tension and viscosity</li> </ul>	Ai et al., 2021

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases contact angle (44.8° to 68.7°).</li> <li>• Reduces <math>\beta</math> sheets, increases random coil structure</li> <li>• Improves emulsion stability and dispersibility</li> </ul>	
<p>EWP 10% (p/p) 20, 28, 35, 40, 50, 20/28 and 20/40 KHz, 375 W / L 25, 35, 45 and 55 °C 10, 20, 30, 40, 50 and 60 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changes in secondary structure</li> <li>• Reduces particle size.</li> <li>• Increases solubility, foam formation, and stability</li> <li>• Increases water holding capacity in gels</li> </ul>	Jun et al., 2020
<p>EWP 180 W 25 min Pulses: 3s on / 2s off</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases surface hydrophobicity and number of sulfhydryl compounds</li> <li>• Increases foam formation capacity (99.13%)</li> <li>• Reduces particle size, increases particle distribution</li> <li>• Improves protein adsorption at the air/water interface</li> </ul>	Chen et al., 2019
<p>EWP 20 kHz 360 W 30 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modifies intermolecular forces</li> <li>• Reduces particle size.</li> <li>• Promotes dispersion, decreases viscosity</li> <li>• Increases and improves foam formation</li> </ul>	Ding et al., 2021
<p>EWP 20 kHz 36 W/cm<sup>2</sup> 55 °C 20 min pH 8.5 Pulses: 3s on and 2s off</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces molecular weight (14.3-20.1 kDa)</li> <li>• Increases solubility, emulsifying properties (22.75%), foam formation capacity (88.5%) and stability (102.6%), oil and water sorption (67.4%).</li> </ul>	Liu et al., 2020

<p>EWP (5% p/v) 20 kHz 45-48 W/cm<sup>2</sup> Pulses: 5s on, 2s off 20 min 25 °C, pH 7</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases diffusion and amount of adsorbed protein at the air/ water interface</li> <li>• Changes secondary and tertiary structures</li> <li>• Increases <math>\beta</math>-helix content (10.3 %), reduces <math>\alpha</math>-helix content (6.3%)</li> <li>• Improves in viscoelastic properties</li> </ul>	<p>Xiong et al., 2019</p>
<p><b>Soy protein</b></p>		
<p>SPI 20 kHz, 4.27 <math>\pm</math> 0.71 W, pH 6.9, 5, 10, 15, 20 min, room temperature, 75, 80 and 85 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces particle size</li> <li>• Increases foam formation capacity and interfacial absorption</li> <li>• US and high temperature show a synergistic positive effect on foaming capacity</li> </ul>	<p>Morales et al., 2015</p>
<p>SPI: rice starch (3:1.5) 20 kHz, 750 W (20-100%) Pulses: 3s on, 1 off 5 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Breaks down protein structure and forms an SPI-starch complex via glycation reactions</li> <li>• Complex exhibits improved consistency, yield stress, firmness, viscosity, water activity, luminosity, and reduces a, b color parameters compared to SPI</li> </ul>	<p>Thirunavookarasu et al., 2021</p>
<p>SPI 0, 120, 240, 360, 480 W 30 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases particle size at 480 W</li> <li>• Decreases particle size and distribution at 120-360 W</li> <li>• Increases surface hydrophobicity</li> <li>• Improved flexibility in molecular structure</li> <li>• Reduces water holding capacity and soluble protein content of gels</li> </ul>	<p>Zhou et al., 2019</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increases hardness and elasticity</li> </ul>	
<p>SPI 20 kHz 200, 300, 400, 500, 600 W 6, 7, 8, 9, 10 min, Pulses: 4 s on, 2 s off</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increases particle size, reduces turbidity at 100-400 W</li> <li>Improved emulsion stability at 1.5%SPI, 500 W, 9 min</li> <li>Improved nanoemulsion droplets distribution in oil-water interface</li> <li>Drop coalescence probability increases with US power</li> </ul>	Teng et al., 2020
<p>SPI-Pectin (1:1 p/p) 22 kHz 270-630 W 15 – 120 min 50 – 90 °C pH 10</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduces <math>\alpha</math>-helix and <math>\beta</math>-sheet contents</li> <li>Improved degree of graft.</li> <li>Increases molecular weight and flexibility</li> <li>Increases surface hydrophobicity and emulsifying properties</li> </ul>	Ma et al., 2020
<p>SPI 1% (p/v) 40 kHz, 200 W 20 min 20 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increases sulfhydryl groups content</li> <li>Increases surface hydrophobicity</li> <li>Boosts solubility (54.4%), emulsifying activity index (64 m<sup>2</sup>/g) and foam formation capacity (44.2 %).</li> </ul>	Ding et al., 2019
<p>SPI 8% (p/v) 20 kHz, 400 W 80 W/cm<sup>2</sup> 10 and 15 min Pulses: 4s on, and 2s off</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Changes secondary and tertiary structure</li> <li>Reduces particle size,</li> <li>Increases sulfhydryl groups content, solubility, gel strength, and water holding capacity.</li> </ul>	Zheng et al., 2019
<p>SPI- Pectin 20 kHz 150, 300, 450 and 600 W, 15 min,</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduces particle size</li> <li>Increases surface hydrophobicity, solubility (89 %), and water dispersibility</li> </ul>	Ning et al., 2021

<p>Pulses: 4s on, 2s off, 20 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces <math>\alpha</math> helix and <math>\beta</math> sheet contents</li> <li>• Exposes hydrophobic groups</li> </ul>	
<p>SPI 8% p/v 20 kHz 80 W/cm<sup>2</sup> Pulses: 4s on and 2s off 10 and 25 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces particle size</li> <li>• Changes secondary and tertiary structure</li> <li>• Increases content of sulfhydryl groups</li> <li>• Increases surface hydrophobicity and solubility</li> <li>• Improved water holding capacity and gel resistance</li> </ul>	<p>Zheng et al., 2021</p>
<p>SPI 10.8-12.1 % (p/p) 20 kHz 30-40 W 30 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changes in molecular weight. Reduces apparent viscosity and droplet size of dispersions</li> <li>• Increases solubility and oil bonding</li> <li>• Improves rheological and textural characteristics</li> <li>• Increases hardness</li> </ul>	<p>Paglarini et al., 2019</p>
<p>SPI 5% (p/v) 20 kHz 600-2000 W 2-30 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces viscosity</li> <li>• Increases hydrophobicity and surface solubility</li> <li>• Reduces <math>\alpha</math>-helices and <math>\beta</math>-turns, increases <math>\beta</math>-sheet contents</li> <li>• Changes in secondary and tertiary structures</li> <li>• Reduces particle size (217.20 nm to 141.23 nm)</li> <li>• Forms larger aggregates, increases Z-potential</li> <li>• Increases hydroxyl radical capture and hydrolysis degree (134.4%)</li> </ul>	<p>Zhao et al., 2019</p>

SPI (1, 3, 5 % p/v) 20 kHz, 562.5, 637.5, 712.5 W, 2, 6, 10 min, < 25 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increases surface hydrophobicity, emulsifying activity index, and foam formation capacity and stability; reduces turbidity, improves dispersibility</li> </ul>	Omura et al., 2021
SPC80 (10 % p/v) 20 kHz 750 W (20-40 %) 10-20 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alters protein hydration process, water sorption capacity, water solubility index</li> <li>Increases thermal stability, enthalpy (2.6 W/g) gel strength (56.3%), and digestibility</li> <li>Increases gelling capacity</li> </ul>	Khatkar et al., 2020
<b>Pea protein</b>		
PPI (5% p/v) 20 kHz 22–25, 34–36 and 45–48 W/cm <sup>2</sup> Pulses: 5s on, 2s off, 30 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exposes sulfhydryl groups</li> <li>Reduces particle size, increases hydrophobicity</li> <li>Reduces interfacial air/water tension</li> <li>Increases foam formation capacity (200%) and stability (73.3%)</li> </ul>	Xiong et al., 2018
PPC (5% p/v), 20 kHz, 412.5 – 712.5 W, 9.69 – 5.6 min 25 °C, pH 2.8, 4.3, 6.8	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increases emulsifying properties</li> <li>Increases water dispersibility capacity</li> <li>Does not change the nutritional value</li> </ul>	de Oliveira et al., 2020
PPI 5% (p/v) 39 W 20-60 W/cm <sup>2</sup> 5s on and 5s off 1,3 and 5 min < 35 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduces particle size (52%), increases solubility (132%), surface hydrophobicity (173%)</li> <li>Promotes protein adsorption in oil-water interface</li> <li>Increases emulsifying activity (18-27%) and capacity (11%)</li> </ul>	Sha et al., 2021

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves physical stability of emulsions</li> <li>• Reduces lipid oxidation during storage</li> <li>• Reduces coalescence</li> </ul>	
<p>PPI 20 kHz, 5 min 68 W/mL pH 2, 4, 10, 12 &lt; 35 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Breaks down disulfide bonds</li> <li>• Increases surface hydrophobicity</li> <li>• Forms aggregates of soluble proteins at pH 12</li> <li>• Increases solubility (7-fold), interfacial protein adsorption rate, and emulsifying properties</li> </ul>	Jiang et al., 2017
<p>PPC (1, 3, 5 % p/v) 20 kHz 562.5, 637.5, 712.5 W 2, 6, 10 min &lt; 25 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produces minimum changes in molecular structure</li> <li>• Increases turbidity</li> <li>• Increases dispersibility, water, and oil holding capacities</li> <li>• Reduces emulsifying activity index</li> <li>• Increases surface hydrophobicity</li> </ul>	Omura et al., 2021
<p>PPI 20 kHz 475 W Pulses: 5s on and 5s off</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduction in particle size</li> <li>• Increases viscosity</li> <li>• Promotes partial coalescence</li> <li>• Improves interfacial properties, emulsion stability</li> <li>• Forms small, uniformly sized crystals.</li> </ul>	Yang et al., 2021
<p>PPI (10% p/v) 20 kHz 31.15-55.39 W/cm<sup>2</sup> 10 and 20 min Pulses: 5s on and 3s off</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unfolds and modifies secondary and tertiary structures</li> <li>• Exposes hydrophobic groups</li> <li>• Reduces particle size, induces aggregate formation, increases surface hydrophobicity</li> <li>• Reduces surface charge</li> </ul>	Cheng & Cui, 2021

<b>Lupin protein</b>		
LPI (10 % p/p) 20 kHz 400 W 5, 10, and 20 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modifies secondary and tertiary structures, particle size, Z-potential, and crystallinity</li> <li>• Reduces <math>\alpha</math>-helix components</li> <li>• Increases <math>\beta</math>-sheet content</li> <li>• Increases yield and antioxidant activity</li> </ul>	Fadimu et al., 2021
LPI (3% p/v) 20 kHz, 5, 30 min pH 12	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distortion and breakage of protein particles</li> <li>• Increases water holding (77.50%), foam stability (32.50%), and emulsion stability (81.65%)</li> </ul>	Rababah et al., 2021
Lupine flour 20 kHz, 200 W 25 min every 4h (60 h in total) 25 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces ash and starch; increases protein and fiber contents (due to leaching of water-soluble compounds) compared to control</li> <li>• Increases mass transfer rate of soluble compounds to water; reduces the phytic acid content</li> </ul>	Yaver & Bilgiçli, 2021
Lupine flour 24 kHz 85 W/cm <sup>2</sup> pH 9 10 and 15 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changes in the secondary structure of proteins</li> <li>• Reduces <math>\alpha</math>-helix</li> <li>• Increases solubility, water holding capacity</li> <li>• Increases sulfur-containing amino acids</li> <li>• Improves gelling properties (strength and yield)</li> </ul>	Aguilar-Acosta et al., 2020
LPI 24 kHz, 400 W (20, 40, 60, 180%), 15 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases antioxidant activity, solubility (74.29%), emulsifying activity index (20%)</li> <li>• Reduction of stability de emulsion</li> </ul>	İşçimen & Hayta, 2021

<b>Gluten</b>		
<p>WGP (30 G/L) 40, 28/40, 28/40/80 kHz 10s on and 5s off 30 °C 10 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces particle size &gt;40%</li> <li>• Increases solubility, water, and oil holding capacity</li> <li>• Increases surface hydrophobicity</li> <li>• Reduces <math>\alpha</math>-helix, increases <math>\beta</math>-sheet structures, exposes tryptophan and tyrosine residues.</li> <li>• Increases structure of protein network (26 <math>\mu</math>m)</li> </ul>	<p>Zhang et al., 2020</p>
<p>Corn gluten meal (54.5% protein) 30-80 g/L 20 kHz – 40 kHz, 60-200 W/L 10-40 min 20-45°C Pulses: 5 on, 5-1 off pH 9</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves enzymolysis and dissolution rate</li> <li>• Conformational modification and reductions in particle size, Z-potential and polydispersity index</li> <li>• Increases free sulfhydryl and <math>\beta</math>-sheet contents</li> <li>• Reduces disulfide bonds</li> <li>• Reduces <math>\alpha</math>-helix, <math>\beta</math>-turn contents</li> <li>•</li> </ul>	<p>Wang et al., 2020</p>
<p>Corn gluten meal (58.6 - 60% protein) 40 kHz 10s on -3 off 40 min 20 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changes in structure and morphology of proteins</li> <li>• Causes molecular unfolding, exposes hydrophobic groups</li> <li>• Reduces <math>\alpha</math>-helix (12.2%), increases random coil (2.60%) contents</li> <li>• Increases hydrolysis rate and degree, globular protein functionality</li> </ul>	<p>Zhou et al., 2017</p>
<b>Collagen</b>		
<p>Collagen (1 % p/v) 20 kHz (20-80 %) 750 W, 5s on; 5s off</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases yield</li> <li>• Affects collagen purity</li> </ul>	<p>Petcharat et al., 2021</p>

10-30 min, 4 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No changes in solubility and molecular structure</li> <li>• Partial protein denaturation</li> </ul>	
Collagen II 20-25 kHz 950 W (10.692 ± 0.77 W/cm <sup>3</sup> ) 6, 12, 24 and 36 min Pulses: 2s on and 3s off	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases yield</li> <li>• Modifies secondary structure</li> <li>• Increases thermal stability</li> <li>• Improves water and oil sorption, water-holding, foaming, and emulsifying capacities</li> </ul>	Akram & Zhang, 2020
<b>Gelatin</b>		
Gelatin type A (5% p/v) 20-25 kHz 200,300 and 400 W 20 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces particle size</li> <li>• Increases hydrolysis extent, antioxidant activity, and recovery rate; inhibits hydrogen bonds</li> <li>• Reduces thermal stability of collagen</li> <li>• Improves solubility (75.88 %), surface hydrophobicity, and interfacial characteristics</li> <li>• Increases aliphatic and aromatic amino acid contents</li> </ul>	He et al., 2021
Fish gelatin (10 mg/mL) 20 kHz, 750 W (50, 100 %) 1 and 2 min Pulses: 10s on, 5s off, pH 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases protein solubility and surface hydrophobicity</li> <li>• Alters <math>\alpha</math>-helix and <math>\beta</math>-sheet structures; improves antioxidant activity scavenging free radicals</li> </ul>	Cuevas-Acuña et al., 2020
Pigskin gelatin 200-600 W, 1-20 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves gelling and rheological properties</li> <li>• Increases hydrogen bonds (N-H). Forms triple helix-like structures during the gelling process.</li> </ul>	Li et al., 2019

<p>Gelatin (type B) 50-150 W 5,25 and 45 min 50°C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases gel strength, viscosity, melting point, and gelling capacity</li> <li>• Reduces content of amide B components</li> <li>• Improved gel resistance and gelatin viscosity</li> </ul>	<p>Mirzapour-Kouhdasht et al., 2019</p>
<p>Bovine gelatin (1 % p/v) 53 kHz 500 W 2, and 6 h 60 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases yield</li> <li>• Increases amino acid content</li> <li>• Induces protein denaturation</li> <li>• Enhances porosity</li> <li>• Increases content of amide I components</li> <li>• Produces a denser, irregular, disorganized structure</li> </ul>	<p>Ahmad et al., 2018</p>
<p>Bovine type B gelatin (4% p/v) 24 kHz 100%, 13 °C 50,100, 150 W 40, 60, 120, 180 and 240 s</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Breaks intermolecular structures</li> <li>• Increases water sorption and solubility</li> <li>• Gel firmness increases with sonication time</li> <li>• Increases structural cohesiveness in gels</li> </ul>	<p>Farahnaky et al., 2017</p>
<p>Fish gelatin (1:3 p/v) 40 kHz 200 W 60 min, 60-80 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases fusion and gelation points, gel strength, and apparent viscosity</li> <li>• Reduces diffraction peaks, triple helix structures</li> <li>• Less aggregate formation</li> </ul>	<p>Huang et al., 2017</p>
<p>Pigskin gelatin 40 kHz, 300 W 15 min, 35 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces particle size</li> <li>• Structural changes of <math>\alpha</math>- helix and <math>\beta</math>-turn. Increases solubility, <math>\beta</math>-sheet content, and random coil elements</li> </ul>	<p>Yu et al., 2016</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increases reaction rate constant (27.5%) and enzymatic inactivation constant (27.8%)</li> <li>Reduces activation energy (36.3%) and inactivation energy for enzymes (43%)</li> </ul>	
Chicken feet gelatin 300 W, 100 min, 70 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increases yield (90%), reduces moisture content (5.40%); no differences in protein, fat, ashes</li> </ul>	Widyasari & Rawdkuen, 2014
<b>Maize proteins</b>		
Zein (90 %) 20, 28, 40 kHz 300 W, 40 min, 25 °C Pulses: 10s on and 3s off	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduces particle size, increases distribution</li> <li>Improves thermal stability of zein-chitosan coacervates</li> <li>Increases encapsulation efficiency (65.2%) and charge capacity (31.1%)</li> </ul>	Ren et al., 2019
Zein (98%)-Gum arabic 20/40 kHz 80 W/L 15 min, 25 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Changes in structural characteristics of ternary nanoparticles,</li> <li>Increases encapsulation efficiency (74.2%)</li> <li>Reinforces hydrogen bonds and electrostatic interactions</li> </ul>	Liu et al., 2022
Zein (25 % p/v) 20 kHz 52.95 W/cm <sup>2</sup> Pulses: 5 s on, 5s off 10 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>Particles with spheric, uniform structure</li> <li>Emulsions with uniform-sized distributions, smaller droplets. Becomes stable at low temperatures</li> <li>Increases freeze/thaw stability</li> </ul>	Li et al., 2021

**Table 13.** Effects of power ultrasound in structural and functional properties of polysaccharides

Ultrasound treatment	Structural and functional modifications	Reference
<b>Gums</b>		
k-carrageenan 20 kHz, 50, 100 and 150 W; 0.33-4 min; 2s on and 20 s off, 20 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Structural changes and reduction of molecular weight</li> <li>• Induces carrageenan degradation</li> <li>• Increases solubility, water holding, and texture in gels</li> <li>• Reduces viscosity</li> </ul>	Zendeboodi et al., 2019
Citrus pectin (2 mg/mL) 20 kHz, 100, 200 and 400 W; 5-60 min; 30±0.5 °C Pulses: 10s on, 10s off	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changes in the molecular and conformational structure</li> <li>• Reduces methoxylation degree and neutral sugars in side chains</li> <li>• Destroys inter and intramolecular hydrogen bonds</li> <li>• Changes in rheological and emulsifying properties</li> </ul>	Qiu et al., 2019
Okra pectin 40 kHz 5 W/L 18-180 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases antioxidant and emulsifying activity and viscosity</li> <li>• Structural and conformational changes</li> <li>• Reduces thermal stability</li> </ul>	Xu et al., 2021
Citrus pectin 40 kHz 300 W 10 W/L Pulses: 10s on, 10 s off 60 min 30 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modifies side chains of the polysaccharide</li> <li>• Increases galacturonic acid content</li> <li>• Reduces molecular weight, viscosity, and methoxylation degree</li> <li>• Improves antioxidant activity and in vitro bile acid-binding capacity</li> </ul>	Chen et al., 2021
Citrus pectin (2 mg/mL) 20 kHz 104.7 W/cm <sup>2</sup> 30°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changes in structural and conformational characteristics</li> <li>• Increases emulsion stability</li> </ul>	Wang et al., 2021

5-60 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces droplet size, negatively charged Z-potential</li> <li>• Decreases rheological indexes and gel formation capacity</li> </ul>	
Nut pectin (shell) 20 kHz 100–200 W 10-30 min pH 1.5-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases galacturonic acid content (69.44%) and esterification degree (59.21%)</li> <li>• Reduces molecular weight</li> <li>• Improves emulsifying properties, water, and oil holding capacities, and antioxidant activity</li> </ul>	Asgari et al., 2020
Gum arabic-WPI (1:1, 1:4) 20 kHz, 100-700W Pulses: 2s on, 2s off 50-90 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Speed up glycation reaction (20 min)</li> <li>• Reduces <math>\alpha</math>-helix content</li> <li>• Improved surface hydrophobicity</li> <li>• Reduces browning intensity</li> <li>• Improves solubility, thermal stability, and emulsifying stability and activity</li> </ul>	Chen et al., 2019
k-carrageenan 20 kHz, 50-150 W Pulses: 2s on, 20s off 0.33-4 min 15°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases water solubility (55.47-65.28%), texture parameters (hardness, elasticity, cohesiveness, and gumminess)</li> <li>• Reduces viscosity</li> </ul>	Zendeboodi et al., 2019
<b>Starches (native and modified)</b>		
Rice starch (20% amylose) 25% p/p 300 W 30 min + vacuum (0.09 MPa)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Structural changes in the surface of starch granules</li> <li>• Reduces particle size and narrows distribution</li> <li>• Alters structure of amylose and amylopectin</li> <li>• Reduces relative crystallinity, gelatinization temperature, and retrogradation</li> <li>• Increases gelatinization enthalpy (<math>9.85 \pm 0.31</math> J/g)</li> <li>• Vacuum + ultrasound reduces peak viscosity (<math>262.61 \pm 1.09</math> RVU) of rice flour</li> </ul>	Li et al., 2022

<p>Rice starch (40 g/100 mL water) 20 kHz, 500 W (40 %) 15, 30, 45, 60, 75°C, 20 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases granular swelling power, water, and oil sorption capacity, and thermal properties</li> <li>• Improves pseudoplastic behavior</li> </ul>	<p>Okonkwo et al., 2021</p>
<p>Oat starch US (probe); 5% p/v 20 kHz 150-350 W 39,48,63 W/cm<sup>2</sup> US (bath) 350W 5 W/cm<sup>2</sup> 10 and 20 min 25 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forms cracks and pores in granules</li> <li>• Reduces starch size</li> <li>• Increases amylose content, swelling power, solubility, transmittance, water and oil holding capacities</li> <li>• Reduces gel hardness of gel, crystallinity, and gelatinization enthalpy</li> <li>• Increases syneresis after 5 d</li> <li>• Reduces gelatinization temperature range</li> </ul>	<p>Maniglia et al., 2021</p>
<p>Wheat, rice, corn, and barley starches 24 kHz 100 W 15 and 30 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficial and microstructural changes in granules</li> <li>• Increases yield, digestibility, swelling, and solubility</li> <li>• Increases rapid starch digestion (81.4%)</li> <li>• Reduces resistant starch (3.1%)</li> <li>• Increases G' and G''</li> </ul>	<p>Kaur et al., 2019</p>
<p>Rice starch (21% amylose) 30%p/p 22 kHz 150-600 W Pulses: 5s on, 5s off 20 min, 25 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disintegrates amorphous region in granules</li> <li>• Forms surface cracks and pores in granules</li> <li>• Increases viscosity</li> <li>• Reduces pasting temperature, gelatinization enthalpy</li> </ul>	<p>Yang et al., 2019</p>
<p>Yucca starch (17% amylose) 5% (p/v) 750 W (40 and 60%) 22-65 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Structural changes in granule morphology and crystallinity degree</li> <li>• Increases swelling capacity</li> <li>• Improved water penetration and diffusion (better hydration)</li> </ul>	<p>Monroy et al., 2018</p>

5, 10 and 20 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Breaks up intermolecular bonds, morphological and permeability changes in starch granules</li> </ul>	
Corn starch (25% amylose) 10 % p/p, 20 kHz 30 min, 25 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduces particle size: nano (3-6µm) and microparticles (36-68nm)</li> <li>•Reduces thermal stability and crystallinity (9%) values</li> </ul>	Minakawa et al., 2019
Waxy corn starch, 3% p/v, 25 kHz 190 W, Pulses:10s, 8s off, 4, 8, and 12 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Modifies molecular structure for producing debranched starch nanoparticles with good encapsulation efficiency</li> <li>•Reduces particle size and produces monodisperse distributions</li> <li>•Longer US treatments break down crystalline structure, produces amorphous nanoparticles</li> </ul>	Qin et al., 2020
Corn and potato starches (>98% purity) 30%p/p 20,25, 28 kHz 300 W 30 min Pulses: 5s on and 5 off 25 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Increases resistant starch content; reduces amylose content and gelling enthalpy. Increases crystallinity in corn starch</li> <li>•Increases amylose content and crystallinity; reduces gelatinization enthalpy and resistant starch content in potato starch.</li> <li>•Breaks up ordered molecular structure and rearranged crystalline structure; produces surface cracks; increases consistency coefficient, storage, and loss moduli; reduces flow behavior index and damping factor in both.</li> </ul>	Xiao et al., 2021
Tapioca and maize starches (17% amylose), 20% granules. 40kHz (99%) 10, 20 min; 26 ± 2°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduces enthalpy and crystallinity degree without altering gelatinization temperature</li> <li>•Produces grooves and notches at granules surface</li> <li>•The US prompts retrogradation of native starches</li> </ul>	Rahaman et al., 2021

<p>Tapioca starch 1:4 p/v 20 kHz 140 W 15 min, 40 ± 1 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduces swelling degree, solubility, pasta.</li> <li>• Increases G' and G'' values</li> <li>• Increases resistant and slow digestion starches content</li> <li>• Modifies rheological properties and elasticity</li> </ul>	<p>Khurshida et al., 2021</p>
<p>Rice meal (400 g/L) 24 kHz 180 W (80%) 20 °C 2-60 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produces physical modification of surface granule microstructure</li> <li>• Breaks down amorphous regions and produces melts weak crystals; affects crystalline structures and amide I secondary structures of proteins</li> <li>• Reduces gelatinization temperature (8.76-9.49 J/g dm)</li> <li>• Reduces pasting profile and viscosity with increasing treatment time; increases pasting temperature</li> <li>• Produces stronger gels with longer treatments</li> </ul>	<p>Vela et al., 2021</p>
<p>Potato starch 20 kHz 660 W 30 min 30 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases relative crystallinity and amylose content (30.28%)</li> <li>• Increases hardness and gel adhesivity, light transmission, water sorption capacity (2.15 g/g), solubility (65%), swelling power (39.02g/g), resistant starch content (79,98%), gelling temperature (64°C), peak viscosity (559 BU) and rupture values (366 BU)</li> </ul>	<p>Cao et al., 2020</p>
<p>Sweet potato starch 125 g/L 20 kHz 8 W/mL Pulses: 3s on, 5s off 30 °C 15 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Damages ordered structure and crystalline zone</li> <li>• Breaks down macromolecular chains</li> <li>• Increases conversion rate by enzymolysis (59.10%)</li> <li>• Reduces maximum viscosity (12.1 %), decomposition temperature (7.6%), retrogradation viscosity (6.6%), gelatinization range (TC - TO) (18.8%) and</li> </ul>	<p>Jin et al., 2020</p>

	enthalpy (44,4%). Reduces relative crystallinity (15%)	
Sweet potato (6% p/p) 20 kHz 300 W Pulses: 3s on, 5 s off 15-30 min 30°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Generates surface modification of granules (pores, cracks). Increases particle size</li> <li>•Structural disorganization increased with treatment time, altering molecular distribution, crystallinity degree. Increases swelling power and solubility and reduces the pasting temperature. Strengthens retrogradation</li> <li>•Reduces peak, final, and breakdown viscosity of gelatinized starch</li> <li>•Increases storage modulus (G') and reduces loss modulus (G'')</li> <li>•Strong gel structure forms because of rearrangement and entanglement of amylose and amylopectin interactions</li> </ul>	Wang et al., 2020
Tapioca starch-sucrose – isomalt and maltodextrin 3% p/p starch + 4, 8, 12% of other saccharides before and after US (24 kHz 400 W 30 min, 60 °C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Rearranges intra and intermolecular bonds between water and starch molecules</li> <li>•Alters microstructure and morphology, pasting properties, water sorption, and gelatinization temperature and enthalpy</li> <li>•Increases interactions between hydroxyl groups in polyols and hydrogen bonds in starch.</li> </ul>	Pourmohammadi & Abedi, 2020
Corn starch (28% amylose) 10% p/p 25 kHz 72 W/L 24-26°C, 8h	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Increases the number of carbonyl and carboxyl groups</li> <li>•Reduces pH</li> <li>•Increases apparent amylose content, molecular size distribution</li> <li>•Alters water sorption, water-solubility, pasting properties, and gel strength of starch dispersions</li> </ul>	Castanha et al., 2019

<p>Wheat starch (98% purity) US probe: 24 kHz 200 and 400 W Pulses: 5 min on, 1 min off US bath: 40 kHz 690 W, 15 and 30 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Both methods affect the structure and modulate functionality</li> <li>• Modifies granule structure, produces irregular surfaces</li> <li>• Improves disintegration of starch granules</li> <li>• Increases solubility and oil sorption</li> <li>• Increases turbidity, reduces the swelling capacity</li> <li>• Most significant changes with 200 W US power</li> </ul>	<p>Jamalabadi et al., 2019</p>
<p>Oat starch 5% p/v Bath: 350 W 5 W/cm<sup>2</sup> 10 and 20 min 25 °C  Probe: 20 kHz 39-63 W/cm<sup>2</sup> Pulses: 5 s on, 5 s off 10 and 20 min, 25 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Both processes:</li> <li>• Produce cracks and pores in the starch granule surface</li> <li>• Reduces granule size to nanometric scale</li> <li>• Increases amylose content (22.29-25.26%), swelling power, solubility, transmittance, water (77.67-99.11%) and oil (41.78-57.57%) holding capacities</li> <li>• Reduces gel hardness</li> <li>• Increases initial, peak, and end temperatures of gelatinization process</li> <li>• Reduces gelatinization enthalpy and temperature range Reduces crystallinity degree</li> </ul>	<p>Falsafi et al., 2019</p>
<p>Potato starch (25 % amylose). 40% p/p 24 kHz 200 W (50 and 100%) 20 and 60 min</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changes in the molecular composition of starch; debranching of amylopectin fraction</li> <li>• Improves gelatinization properties</li> <li>• Increases gel resistance and strength</li> <li>• Viscosity and light transmittance (17%) decrease</li> </ul>	<p>Ulbrich et al., 2020</p>
<p>Tapioca starch (solid liquid ratio: 1:1, 1:2) 30 ± 3 kHz, 7750 W (50%)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increases solubility, swelling, textural, pasting, and rheological properties</li> <li>• Produces starch browning</li> <li>• Improves starch freeze/thaw stability</li> <li>• Increases storage and loss moduli</li> </ul>	<p>Krishnakumar &amp; Sajeev, 2018</p>

0 and 50 °C, 10 and 20 min		
Corn starch 30 % p/v 40 kHz 420, 480, 540 W 40, 30, 20 min 50, 40, 60 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produces splits and cracks in granule surface</li> <li>• Increases water diffusion and surface area (Improved exposition of cleavage sites); increases dextrose equivalents (DE) and starch conversion rate</li> <li>• Increases reaction rate constant of enzymatic hydrolysis</li> <li>• Reduction of relative crystallinity, viscosity, enthalpy, molecular weight, and polymerization</li> </ul>	Li et al., 2018
Oat starch 20 kHz 150-350 W 25-50 °C 10 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Breaks down amorphous and weak crystalline structures</li> <li>• A more pronounced effect of higher temperature and US</li> <li>• Increases swelling capacity, solubility, gel clarity, and gelatinization temperature</li> <li>• Reduces gel hardness and retrogradation</li> <li>• US (350 W, 50°C) produces gels with soft, stable textures, low retrogradation, and opacity</li> </ul>	Maghsoudlou et al., 2020
Sweet potato and wheat meals (20g/200 mL agua) 20 kHz 750 W (50%) Pulses: 3s on, 1s off 2-20 h, 20 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Structural changes in starch granules</li> <li>• Reduces particle size and crystallinity</li> <li>• Reduces gelatinization enthalpy, pasting properties, gel hardness, <math>\alpha</math>-amylase activity, and viscosity</li> <li>• Increases digestibility and retrogradation degree</li> </ul>	Cui et al., 2020
<b>Maltodextrin and Dextrin</b>		

Maltodextrin-SPI 3:6 % p/v 20 kHz 200 W 138 W/cm <sup>2</sup> Pulses: 3s on, 1 off 5-15 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Increases ordered type <math>\beta</math> secondary structure</li> <li>•Increases isoelectric point, surface hydrophobicity (H<sub>0</sub>), free sulfhydryl groups (-SH), and particle size in conjugates at 5-min treatment.</li> <li>•Increases gelling rate, storage modulus (G'), gel strength, and water holding capacity.</li> </ul>	Zhao et al., 2021
Maltodextrin-SPI (1:1) 20 kHz, 150,300,450 and 600 W, 30 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduces particle size of emulsions (450W)</li> <li>•Increases degree of maltodextrin – SPI covalent bonding</li> <li>•Improves stability and embedding effect of microcapsules</li> <li>•Enhances emulsifying properties and emulsion stability</li> </ul>	Wang et al., 2021
Corn dextrin 42 kHz, 135 W 25, 50 and 70 °C, 60 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduces relative crystallinity, amorphous regions, and viscosity. Improves emulsion stability</li> <li>•Reduces gelling temperature and enthalpy of fusion</li> </ul>	Han et al., 2019
<b>Cellulose</b>		
MC (0.5-2% p/v) 48 kHz, 20W 20 min 25 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduces water (49.9%) and oil (31%) holding capacity</li> <li>•G' and G'' values show una estructura de gel fuerte</li> <li>•Minimizes mass transfer between water and oil</li> </ul>	Lua et al., 2020
Cellulose (5g/L) 20 kHz (horn); 37 kHz (bath) 500 and 370 W (60%) 50 ± 2 °C, 0-60 min, pH 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduces particle size, changes particle distribution</li> <li>•Increases water sorption and holding capacities</li> <li>•Improved accessibility for enzymatic degradation; increases reducing sugar concentration</li> </ul>	Csiszar et al., 2021

CMC 22 kHz 900 W, (0-30 W/mL), 5-50 min, 55°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradation of CMC chains (35.73%)</li> <li>• Reduction in thermodynamic parameters of hydrolysis reactions, molecular weight (31.74%), and viscosity</li> </ul>	Hou et al., 2018
MCC 20kHz 525W 4min 10°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Breaks up crystalline structure, reduces particle size</li> <li>• Improves stability water/oil interface of emulsions</li> <li>• Increases viscosity</li> </ul>	Meirelles et al., 2020
Cellulose 53 kHz 100 W 30 °C 10, 20, 25 and 30	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provokes depolymerization, reduces molecular weight</li> <li>• Increases surface area, free hydroxyl groups, and weak hydrogen bonds. Produces changes in porosity</li> <li>• Increases water and oil holding and swelling capacities</li> </ul>	Yan et al., 2020
CMC , 21-23 kHz 800 W Pulses: 2s on, 4s off, 25°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alters microfibrillar structure, reduces crystallinity (<math>84.8 \pm 0.2\%</math>) and polymerization degree (<math>124.7 \pm 0.6</math>)</li> <li>• Improved reducing sugar yield (<math>22.9 \pm 0.3</math> g/100 g)</li> </ul>	Zhang et al., 2016
<b>Inulin</b>		
Inulin 20g/100m (p/v) 24 kHz 247.8, 743.5, 1239.2 and 1734.9 W/cm <sup>2</sup> 25 °C Pulses: 5s on, 5s off 2.5, 5, 7.5 and 10 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changes in molecular structure</li> <li>• Reduces particle size</li> <li>• Increases apparent viscosity, <math>G'</math> and <math>G''</math></li> <li>• Improves hardness and adhesivity</li> <li>• Changes in relative crystallinity</li> <li>• Yields partial inulin unfolding and reduced granule size</li> </ul>	Lou et al., 2021

Chicory inulin (69.99%) 5g/100mL water 20 kHz 90W, 1, 2 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Increases reducing sugar content (up to 2.18%)</li> <li>•Changes in particle size (50-120 <math>\mu\text{m}</math>) and microstructure (smooth and porous surfaces)</li> <li>•Increases water solubility index (58.39%)</li> </ul>	Xu et al., 2021
Untreated and purified Jerusalem artichoke inulin 20 kHz 90W 1 and 2 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Increases reducing sugar content up to 12.27%, reduces water solubility index (18.33%) and increases viscosity in untreated inulin. Increases reducing sugar content up to 10.86%, reduces polymerization degree in purified inulin. Produces changes in microstructure and particle size in both inulin types</li> </ul>	Xu et al., 2021
Daliah inulin, 1:20 p/v 45 kHz 30 W, 45 $^{\circ}\text{C}$ 15 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduces molecular weight and polydispersity index</li> <li>•Increases purity (97%), yield (42%) and thermal stability</li> </ul>	Petkova et al., 2018
<b><math>\beta</math>-glucan</b>		
Oat $\beta$ -glucan 0-400 W 3-7 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Increases yield (52%), emulsion stability (69%), solubility (75.6%), and water holding capacity (13.2 g/g); reduces viscosity</li> </ul>	Motamedzadegan et al., 2021
Yeast $\beta$ -glucan 20 kHz 420 W, 25 $^{\circ}\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduces particle size (1.77 – 7.19 <math>\mu\text{m}</math>)</li> <li>•Produces rough aggregates; exposes internal structure</li> <li>•Increases surface area (32.3%), purity (98.8%) and yield</li> </ul>	Zheng et al., 2019

**Table 14.** Most important improvements in power ultrasound-modified fat mimetics in selected food products

Modified biopolymer	Food	Benefits	References
---------------------	------	----------	------------

WPC	Skim model cheese	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Increases protein retention</li> <li>•Improves texture and thermal stability</li> </ul>	Gamlath et al., 2020
WPC	Panela cheese	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Increases yield</li> <li>•Increases protein, salt, and moisture</li> <li>•Reduces fat content (5.22%)</li> <li>•Sensory profile, syneresis, and color parameters were unaffected</li> </ul>	Amador-Espejo et al., 2021
MCC	Cheese	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduces moisture content and water activity</li> <li>•Decreases color parameters and syneresis (after 24 d of storage)</li> <li>•Decreases hardness, flexibility, cohesiveness, and adhesivity</li> </ul>	Lara-Castellanos et al., 2021
Rice starch	Sauces	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Better pseudoplastic behavior</li> <li>•Improved freeze/thaw stability</li> <li>•Improves texture and sensory properties</li> </ul>	Okankwo et al., 2021
Methylcellulose	French fries coating	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Increases oil sorption in fried foods</li> <li>•Enhances gelling properties</li> <li>•Reduces fat content in fried foods</li> </ul>	Lua et al., 2020