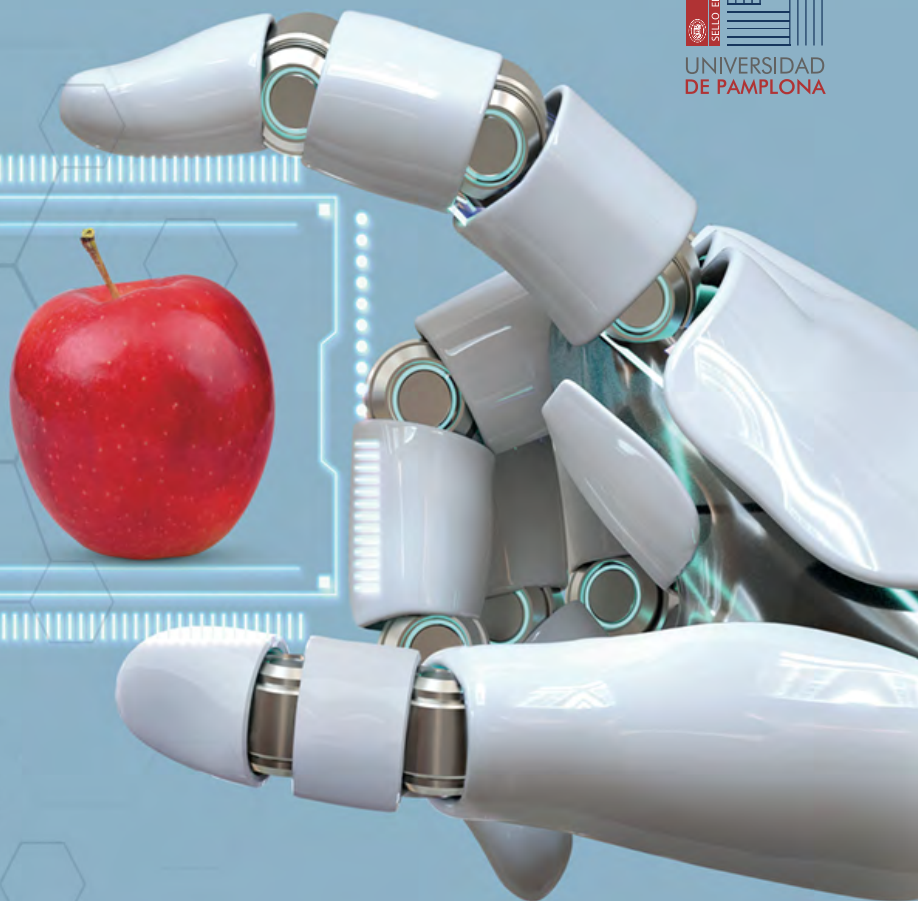




Tecnologías emergentes

para la conservación de alimentos

Victor Manuel Gelvez Ordoñez

Tecnologías emergentes

para la conservación de alimentos

Tecnologías emergentes

para la conservación de alimentos

Victor Manuel Gelvez Ordoñez



Vicerrectoría de
INVESTIGACIONES
UNIPAMPLONA

“Formando nuevas generaciones con
sello de excelencia comprometidos
con la transformación social de las
regiones y un país en paz.”

Tecnologías emergentes para la conservación de alimentos / Victor Manuel Gelvez Ordoñez -- Pamplona: Universidad de Pamplona. 2025.

158 p. 17 cm x 24 cm

ISBN (Digital): 978-628-7656-83-3

© Universidad de Pamplona

© Sello Editorial Unipamplona

Sede Principal Pamplona, Km 1 Vía Bucaramanga-Ciudad Universitaria. Norte de Santander, Colombia.

www.unipamplona.edu.co

Teléfono: 6075685303

Tecnologías emergentes para la conservación de alimentos

Victor Manuel Gelvez Ordoñez

ISBN (digital): 978-628-7656-83-3

DOI: <https://doi.org/10.24054/a996hr37>

Primera edición octubre de 2025

Colección Ciencias e Innovación

© Sello Editorial Unipamplona

Rector: Ivaldo Torres Chávez Ph.D

Vicerrector de Investigaciones: Aldo Pardo García Ph.D

Vicerrectora académica: Laura Patricia Villamizar. Ph.D

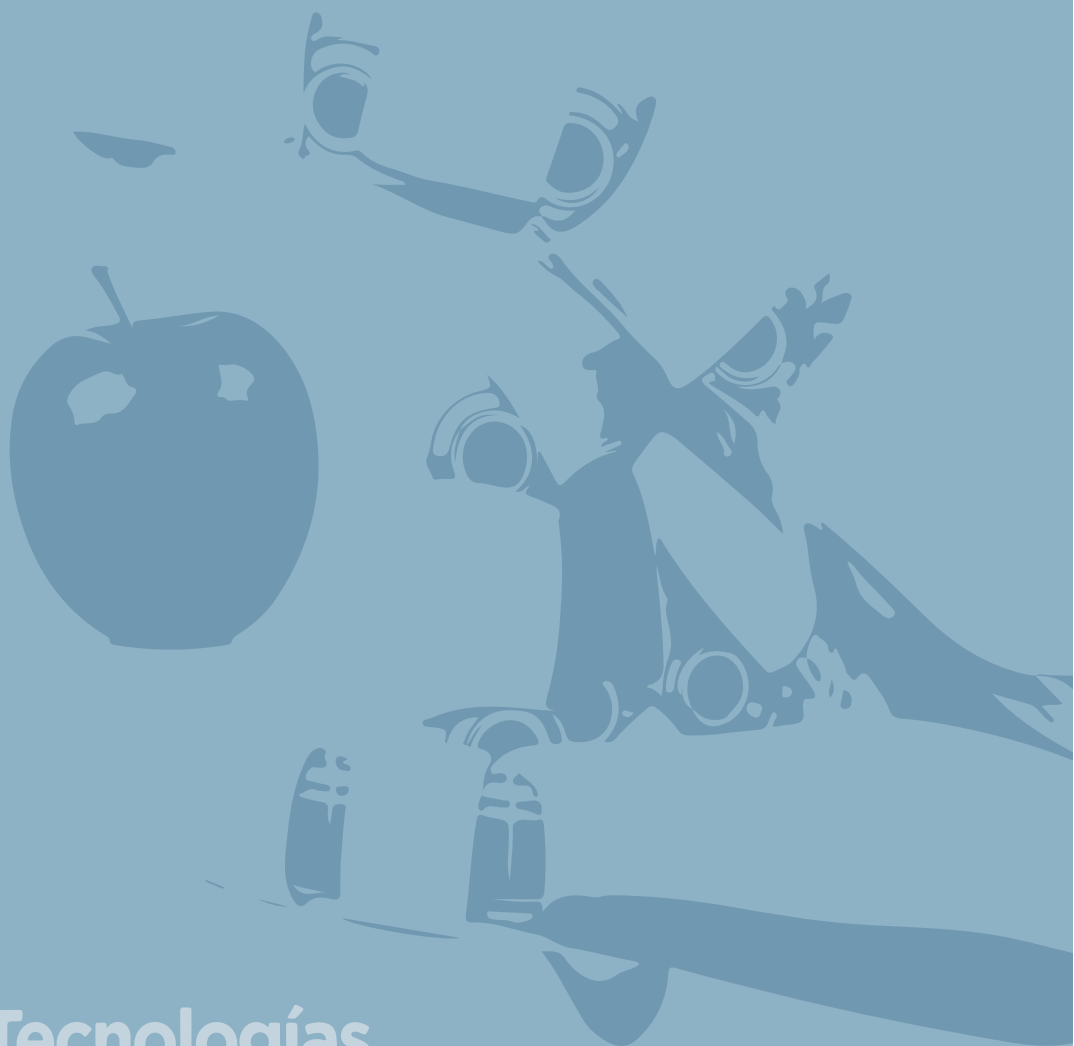
Jefe Sello Editorial Unipamplona: Caterine Mojica Acevedo

Corrección de estilo: Andrea del Pilar Durán Jaimes

Diseño y diagramación: Laura Angelica Buitrago Quintero

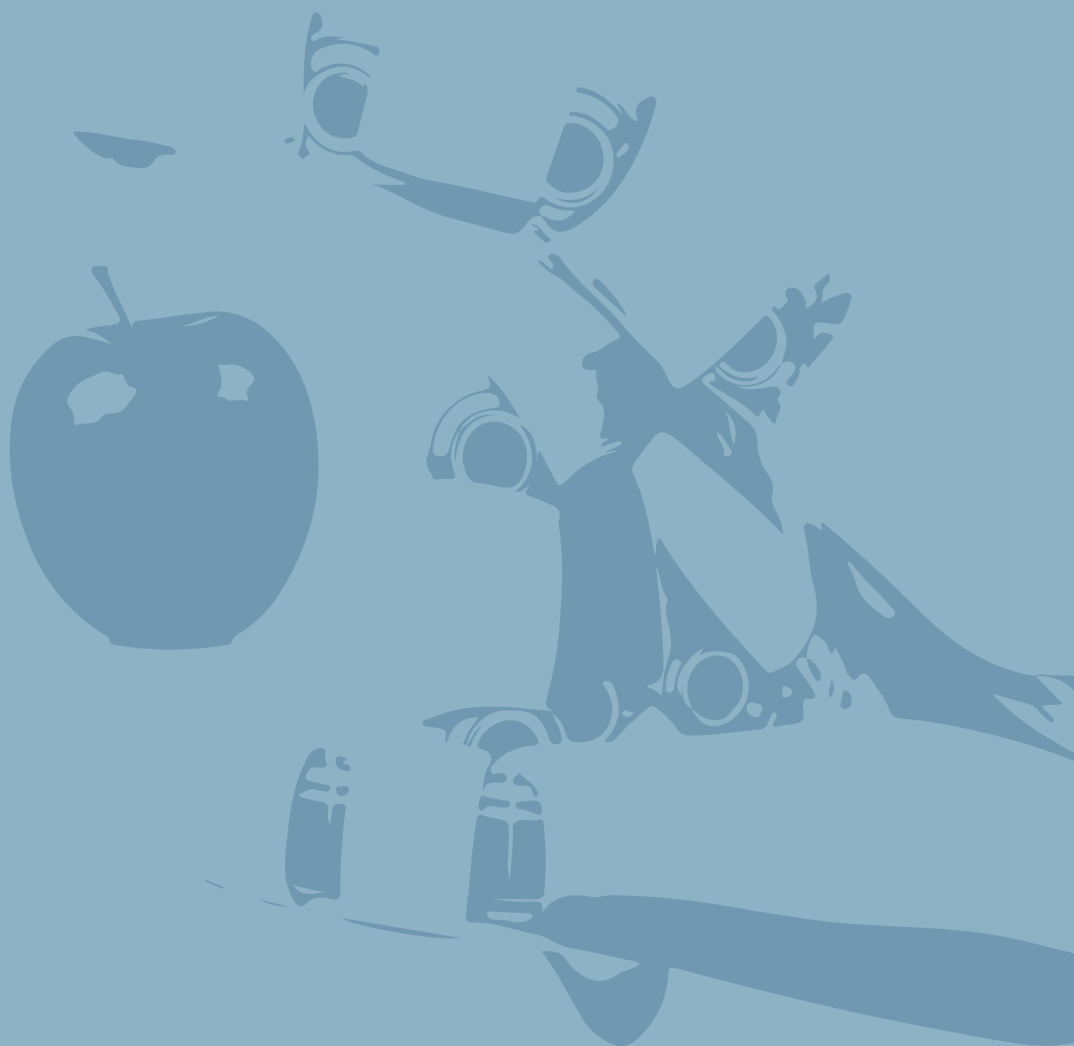
Hecho el depósito que establece la ley. Todos los derechos reservados. Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio, sin permiso del editor.





Tecnologías emergentes

para la conservación de alimentos



ÍNDICE

Presentación.....	13
Resumen.....	15
Abstract.....	17

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN	21
---------------------------	----

Definición.....	22
Clasificación.....	23
<i>Según los procesos</i>	23
<i>Según su grado de desarrollo</i>	25
Bibliografía.....	28

CAPÍTULO II

ULTRASONIDO	33
--------------------------	----

Objetivo.....	33
Definición y fundamento.....	33
<i>Dimensión y nomenclatura</i>	33
<i>Definición y clasificación</i>	33
<i>Generación de ultrasonido</i>	34
Efecto de la aplicación de ultrasonido.....	36
Estado del arte.....	37
Efectos en los componentes alimentarios.....	39
Bibliografía.....	48

CAPÍTULO III

ALTAS PRESIONES ISOSTÁTICAS	63
--	----

Objetivo.....	63
Definición y fundamentos.....	63
<i>Dimensión y nomenclatura</i>	63
<i>Generación de alta presión</i>	63
Efectos de la aplicación de alta presión.....	66
Estado del arte.....	67
Efectos en las matrices alimentarias.....	69
Bibliografía.....	78

CAPÍTULO IV

IRRADIACIÓN	89
Objetivo.....	89
Definición y fundamentos	89
<i>Dimensión y nomenclatura</i>	89
<i>Definición y clasificación</i>	89
Efectos de la aplicación de irradiación	93
Estado del arte	96
Efectos en las matrices alimentarias.....	97
Bibliografía	104

CAPÍTULO V

CAMPOS MAGNÉTICOS	115
Objetivo.....	115
Definición y fundamentos	115
<i>Dimensión y nomenclatura</i>	115
Generación de campos magnéticos.....	117
Efectos de la aplicación de campos magnéticos.....	117
Estado del arte	119
Efectos en las matrices alimentarias.....	120
Bibliografía	129

CAPÍTULO VI

PLASMA FRÍO	137
Objetivo.....	137
Definición y fundamentos	137
<i>Dimensión y nomenclatura</i>	137
Definición y clasificación.....	138
Generación de plasma frío.....	140
Efectos de la aplicación de plasma frío en alimentos	141
Estado del arte	143
Efectos en las matrices alimentarias.....	145
Bibliografía	151

Perfil del autor	159
-------------------------------	-----

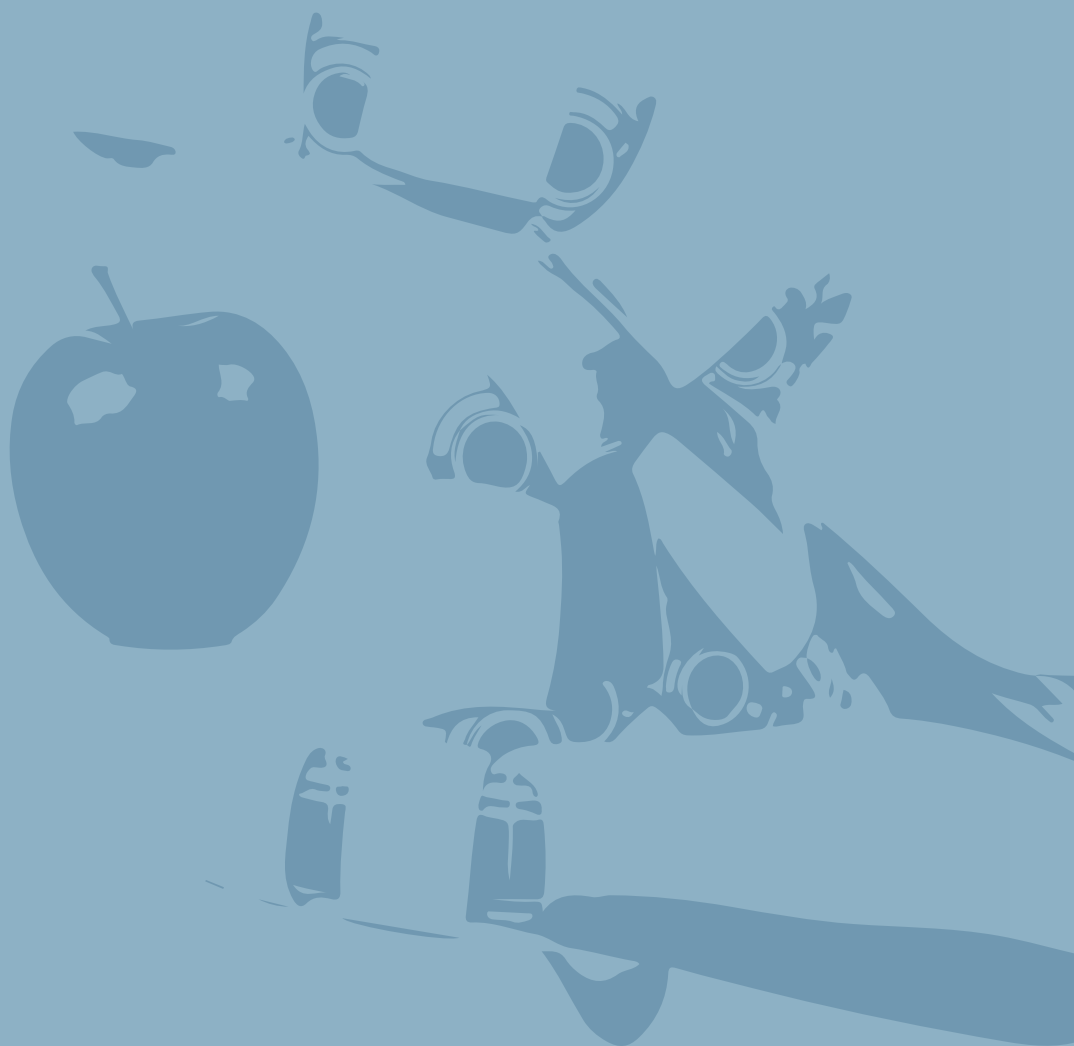
ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las tecnologías emergentes de acuerdo al tratamiento.....	23
Tabla 2. Clasificación del Índice Global de Innovación (IGI) en el 2021 de países por nivel de ingresos.....	26
Tabla 3. Nomenclatura de la unidad de medida del ultrasonido según el SI.....	33
Tabla 4. Clasificación del ultrasonido según su intensidad y aplicación.....	34
Tabla 5. Efectos de la aplicación de ultrasonido en alimentos	36
Tabla 6. Efectos de la aplicación de altas presiones isostáticas.....	66
Tabla 7. Clasificación de las radiaciones no ionizantes	90
Tabla 8. Relación de los principales efectos de la radiolisis en alimentos	94
Tabla 9. Efectos de la irradiación gamma en los componentes de los alimentos.....	95
Tabla 10. Clasificación de los materiales de acuerdo a sus propiedades magnéticas.	116
Tabla 11. Clasificación de los campos magnéticos de acuerdo a su naturaleza y principios de funcionamiento	116
Tabla 12. Efectos físicos y químicos de los campos magnéticos.....	118
Tabla 13. Clasificación de plasma	139
Tabla 14. Efectos de la aplicación de plasma frío.....	142



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de las tecnologías emergentes según su nivel de desarrollo.	27
Figura 2. Esquema de un generador de ultrasonido.....	34
Figura 3. Esquema de la generación del fenómeno de cavitación.	35
Figura 4. Esquema del efecto del ultrasonido.....	36
Figura 5. Investigaciones de efectos de ultrasonido por palabras clave en el periodo 2016 a 2022.	38
Figura 6. Investigaciones de efectos de ultrasonido por países en el periodo 2016 a 2022.	38
Figura 7. Esquema de una maquina de API.	64
Figura 8. Esquema del proceso de homogeneización a alta presión.	65
Figura 9. Estado del arte sobre producción científica de investigaciones con altas presiones por palabras clave.	68
Figura 10. Estado del arte sobre producción científica de investigaciones con altas presiones por país.....	68
Figura 11. Diagrama que ilustra el efecto de la temperatura y presión en la desnaturalización de las proteínas.	70
Figura 12. Esquema de una instalación de irradiación por rayos gamma (60 Co).	92
Figura 13. Resultados de estudio bibliométrico con palabras clave sobre la aplicación de irradiación en matrices alimentarias.	96
Figura 14. Resultados de estudio bibliométrico sobre la investigación por países en la aplicación de irradiación en alimentos.....	97
Figura 15. Esquema de producción de campo magnético.....	117
Figura 16. Resultados de estudio bibliométrico con palabras clave sobre la aplicación de campos magnéticos en matrices alimentarias.....	119
Figura 17. Resultados de estudio bibliométrico de producción bibliográfica sobre la aplicación de campos magnéticos en matrices alimentarias por países.....	120
Figura 18. Esquema de la producción de plasma frío.	140
Figura 19. Resultados de estudios bibliométricos por palabras clave sobre estudios de plasma frío.....	144
Figura 20. Resultados de estudios bibliométricos por país que investiga sobre plasma frío.	144



Presentación

La industria alimentaria, un pilar fundamental en la economía global, se encuentra en constante evolución. Impulsada por una creciente demanda de alimentos seguros, nutritivos y de alta calidad, busca constantemente nuevas soluciones tecnológicas para optimizar sus procesos y desarrollar productos innovadores.

Este libro nace de la convicción de que la investigación y el desarrollo en el área de ciencia y tecnología de alimentos son claves para garantizar la sostenibilidad y la competitividad del sector en nuestro país. A lo largo de mi trayectoria como docente e investigador, he sido testigo de la creciente necesidad de contar con herramientas y conocimientos actualizados para abordar los desafíos que enfrenta la industria alimentaria.

En las últimas décadas, hemos asistido a un auge de las tecnologías emergentes, las cuales ofrecen nuevas y prometedoras alternativas para la conservación, el procesamiento y el desarrollo de productos alimenticios. Estas tecnologías, basadas en principios científicos sólidos, permiten mejorar la calidad de los alimentos, prolongar su vida útil, reducir el desperdicio y abrir las puertas a la creación de productos más saludables y funcionales.

A través de este trabajo, me propongo realizar una revisión exhaustiva de las tecnologías emergentes más relevantes en el ámbito de la ciencia y tecnología de alimentos, con un enfoque especial en sus aplicaciones prácticas y su potencial para transformar la industria. Asimismo, se presentarán los resultados de investigaciones propias y de otros autores, con el objetivo de compartir los avances más recientes en

este campo y estimular la discusión y el intercambio de conocimientos.

Este libro está dirigido a estudiantes, investigadores, profesionales de la industria alimentaria y a todos aquellos interesados en conocer las últimas tendencias y desafíos en este apasionante campo. Mi objetivo es proporcionar una visión integral de las tecnologías emergentes, sus beneficios y limitaciones, así como su impacto en la cadena de valor alimentaria.

Al finalizar esta lectura, el lector contará con las herramientas necesarias para comprender el papel fundamental que desempeñan las tecnologías emergentes en la alimentación del futuro y podrá identificar oportunidades para la innovación y el desarrollo de nuevos productos y procesos.

Resumen

El libro aborda un amplio espectro de tecnologías emergentes aplicadas en la industria alimentaria, con especial énfasis en tratamientos no térmicos diseñados para preservar la calidad de los alimentos sin comprometer sus propiedades nutricionales y organolépticas. Entre las principales tecnologías analizadas se encuentran el plasma frío, los campos magnéticos, el ultrasonido, la irradiación y las altas presiones isostáticas.

Cada tecnología es estudiada desde su base científica y su aplicación en el procesamiento y conservación de matrices alimentarias. Se analizan sus efectos sobre propiedades físicas y químicas, con un énfasis especial en las proteínas: Sus propiedades funcionales, estructura molecular, retención de agua, estabilidad oxidativa, textura y capacidad antimicrobiana. Se discuten aspectos específicos como la modificación de enlaces disulfuro, la exposición de grupos hidrofóbicos y los cambios en la conformación secundaria y terciaria, todos cruciales para la mejora de las características funcionales y sensoriales del producto final.

Un valor diferencial del libro es la inclusión de resultados de estudios propios realizados por los autores, lo cual enriquece el contenido con evidencia práctica actualizada y específica. Para complementar esta información, se presentan estudios bibliométricos que evidencian el nivel de la producción científica mundial referente a cada tecnología, destacando especialmente la prevalencia de trabajos recientes. Este análisis permite situar la obra en un contexto contemporáneo y relevante, mostrando la

evolución y las tendencias actuales en la investigación de tecnologías emergentes en alimentos.

Así, el documento proporciona una visión integral y rigurosa sobre las tecnologías no térmicas en el procesamiento de alimentos, resaltando su potencial de innovación, sus beneficios y limitantes, y ofreciendo recomendaciones para su implementación industrial, contribuyendo a la optimización de procesos y al desarrollo de productos alimentarios más seguros, funcionales y sostenibles.

Palabras clave: Plasma, Campos magnéticos, proteínas, conservación, alimentos, emulsiones, antioxidantes, textura

Abstract

The book addresses a broad spectrum of emerging technologies applied in the food industry, with a special emphasis on non-thermal treatments designed to preserve food quality without compromising its nutritional and organoleptic properties. The main technologies analyzed include cold plasma, magnetic fields, ultrasound, irradiation, and high isostatic pressure.

Each technology is studied from its scientific basis and its application in the processing and conservation of food matrices. The analysis covers their effects on physical and chemical properties, with a particular focus on proteins: their functional properties, molecular structure, water retention, oxidative stability, texture, and antimicrobial capacity. Specific aspects are discussed, such as the modification of disulfide bonds, the exposure of hydrophobic groups, and changes in the secondary and tertiary conformation, all of which are crucial for improving the final product's functional and sensory characteristics.

A differential value of the book is the inclusion of results from the authors' own studies, which enriches the content with updated and specific practical evidence. To complement this, bibliometric studies are presented to evidence the level of global scientific production for each technology, particularly highlighting the prevalence of recent work. This analysis allows the work to be placed in a contemporary and relevant context, showcasing the evolution and current trends in the research of emerging food technologies.

Thus, the document provides an integral and rigorous vision of non-thermal technologies in food processing, highlighting their innovative potential, benefits, and limitations, while offering recommendations for industrial implementation, contributing to process optimization and the development of safer, more functional, and sustainable food products.

Keywords: Plasma, Magnetic fields, proteins, preservation, food emulsions, antioxidants, texture

CAPÍTULO I

Introducción

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Cada año, millones de toneladas de alimentos se desperdician en todo el mundo, mientras millones de personas pasan hambre. Esta paradoja es un reflejo de un sistema alimentario ineficiente y de los desafíos planteados por el cambio climático. Las tecnologías emergentes ofrecen una oportunidad única para transformar este sistema y garantizar una alimentación segura y sostenible para todos. Este trabajo explorará cómo estas tecnologías pueden contribuir a reducir el desperdicio alimentario, mejorar la calidad nutricional de los alimentos y fortalecer la seguridad alimentaria a nivel global.

Según la Organización de las Naciones Unidas (FAO, FIDA, OMS, 2022), cerca de 690 millones de personas en el mundo padecen hambre, una cifra que se prevé aumente en los próximos años debido a conflictos, cambio climático y crisis económicas. Paralelamente, la crisis ambiental se agudiza, con un aumento de las temperaturas globales y de los niveles de gases de efecto invernadero.

Ante este panorama, la ONU ha propuesto una serie de estrategias para abordar estos desafíos, entre las que destacan el desarrollo de industrias sostenibles, la transformación del sistema agroalimentario y la adopción de tecnologías limpias. En Colombia, el informe de la Comisión de Sabios también ha señalado la necesidad de impulsar la innovación y la biotecnología para aprovechar la biodiversidad y promover la agricultura sostenible.

Las tecnologías emergentes tienen el potencial de transformar la industria alimentaria. Este trabajo explora cómo estas tecnologías, que se basan en principios científicos innovadores, pueden mejorar la conservación de alimentos, reducir el desperdicio y satisfacer las demandas de los consumidores por productos más saludables y sostenibles. Al ofrecer alternativas a los métodos tradicionales, estas tecnologías abren nuevas oportunidades para la innovación y el desarrollo de productos

alimentarios, contribuyendo a los objetivos de desarrollo sostenible y planes de desarrollo nivel regional, nacional.

Definición

A lo largo de la historia el hombre, en su lucha por su subsistencia y la preservación de la vida ha creado, utilizado, desarrollado e implementado diversos mecanismos, procesos y sistemas, tanto naturales como físicos y químicos para mejorar el consumo, el aprovechamiento y el uso de los alimentos.

La Revolución Industrial iniciada a mediados del siglo XVIII, marcó un hito en la historia al transformar radicalmente los sistemas de producción y consumo. El paso de una economía rural a una urbana e industrializada generó un crecimiento exponencial de las ciudades y nuevas demandas alimentarias. Los cambios en los ritmos de vida, los hábitos de consumo y la urbanización impulsaron la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías de producción, procesamiento y conservación de alimentos, sentando las bases para la industria alimentaria moderna.

Hoy en día, el mundo enfrenta una crisis alimentaria compleja y multifacética, agravada por la pandemia de COVID-19. Cifras alarmantes revelan que alrededor de 330 millones de personas padecen hambre o desnutrición, mientras que se estima que se pierde un 40% de los alimentos producidos a nivel mundial. Paralelamente, la producción de alimentos contribuye significativamente al cambio climático, representando aproximadamente el 10% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Estos desafíos se ven exacerbados por factores como el crecimiento demográfico, la urbanización, los cambios en los patrones de consumo y la volatilidad de los mercados alimentarios (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2021).

Lo anterior, ha generado la necesidad de creación de una política de seguridad alimentaria que implica la disponibilidad de alimentos con calidad. Por lo tanto, es necesario la innovación, para garantizar la calidad,

inocuidad, cantidad y diversidad de alimentos. En este sentido, se han desarrollado nuevas tecnologías para el procesamiento y conservación denominadas tecnologías emergentes, las cuales son definidas como: Técnicas o procesos innovadores y energéticamente eficientes para asegurar la seguridad (inocuidad), calidad (apariencia, funcionalidad, nutrición y salubridad) y vida útil de las matrices alimentarias.

Clasificación

Según los procesos

Jermann et al. (2015) y Valdivia-Nájar (2020) proponen una clasificación general de las tecnologías emergentes en térmicas y no térmicas. Las tecnologías térmicas, como su nombre indica, utilizan el calor para procesar los alimentos y modificar sus características. Si bien el calor puede mejorar la digestibilidad de algunos nutrientes, también puede reducir el contenido vitamínico y mineral de los alimentos. Por otro lado, las tecnologías no térmicas se basan en otros principios físicos para inactivar microorganismos, inactivar enzimas y modificar las propiedades de los alimentos sin recurrir al calor, lo que permite preservar en mayor medida sus características nutricionales y sensoriales. La Tabla No.1, muestra la clasificación de las tecnologías emergentes de acuerdo al tratamiento.

Tabla 1
Clasificación de las tecnologías emergentes de acuerdo al tratamiento

Clasificación	Nombre	Sigla	Principio
Térmicos	Microondas	MW	Las microondas de alta frecuencia producidas a partir de la conversión de energía eléctrica en energía electromagnética por un magnetrón, generan movimientos rápidos en los componentes de las matrices alimentarias produciendo calor por fricción, el cual se transmite del interior al exterior del alimento (Díaz & Moreno, 2017).

Clasificación	Nombre	Sigla	Principio
Térmicos	Radiofrecuencia	RF	Basado en la rotación dipolar y conducción iónica. En el primero las moléculas rotan para alinearse a un campo eléctrico creado y en el segundo los iones presentes se mueven a lado opuesto de su carga. Al cambiar a grandes velocidades la orientación del campo eléctrico se producen movimientos que causan choques y fricción generando calor (Purcell, 2001).
	Irradiación Infrarroja	IR	Las moléculas absorben la energía de la irradiación infrarroja del espectro electromagnético provocando movimientos y ondas electromagnéticas que resultan en la excitación molecular (Fontal et al., 2005).
	Calentamiento Ohmico	CH	Se produce aumento de la temperatura por efecto de la resistencia del alimento al paso de una corriente eléctrica aplicada (Alzate, 2003).
No térmicos	Alta Presión Isostática	IHP	Se aplica alta presión (100-600 MPa o superior) durante corto tiempo, en un sistema cerrado, teniendo como medio de transmisión un líquido (Figueroa-Sepúlveda, et al., 2021).
	Ultrasonido	US	La atracción de moléculas polarizadas por la transmisión de un campo eléctrico mediante dos electrodos hasta un material ferroeléctrico (el cual se deforma) produce el ultrasonido que después se convierte en oscilación mecánica y se amplifica para ser transmitido al medio produciendo diferentes fenómenos (Robles-Ozuna & Ochoa-Martínez, 2012).
	Pulsos Eléctricos	PE	El alimento es puesto en una solución electrolítica entre dos electrodos por periodos cortos de tiempo y se le aplica pulsos de alto voltaje. El efecto varía según la matriz alimentaria y condiciones de tratamiento (Vivanco et al., 2021).
	Pulsos de Luz	PL	La ionización un gas por la aplicación de pulsos eléctricos de alta intensidad y corta duración en un reactor provoca un flash o pulso lumínico de alta intensidad y ancho espectro de emisión que forma diferentes compuestos o fenómenos en las matrices tratadas (Fernández & Hierro, 2016).

Clasificación	Nombre	Sigla	Principio
No térmicos	Luz Ultravioleta	LU	La radiación UV absorbida por la matrices tratadas produciendo efectos en especial en los electrones induciendo cambios físicos y reacciones (Domínguez & Parzanese, 2011).
	Irradiación Ionizante	IO	La energía radiante proveniente de una fuente de radiación controlada provoca colisión o ionización en las moléculas de las matrices expuestas (Pereda et al., 2005).
	Plasma Frío	PF	Los electrones de un gas son acelerados, por la energía de campos eléctricos o magnéticos aplicados, hasta producir la ionización de sus componentes liberando más cantidad de electrones que producen el mismo efecto y provocan excitaciones de átomos y moléculas que al volverse estables emiten radiaciones electromagnéticas (Wilches, 2015).

Fuente: Elaboración propia (2022)

Según su grado de desarrollo

Para el procesamiento de alimentos, el uso de las nuevas tecnologías o tecnologías emergentes ha dependido del desarrollo económico, las inversiones en ciencia, tecnología e innovación y la interacción de los centros de investigación con el sector industrial de cada país. De esta manera, tal como lo muestra el Índice Global de Innovación (IGI, 2021) los países con mayor índice de ingresos son los que tienen mayor productividad en conocimiento y tecnología. La siguiente Tabla muestra la posición de los tres primeros países en el Índice Global de Innovación 2021 de acuerdo a su nivel de ingresos en la cual se demuestra dicho efecto.

Tabla 2

Clasificación del Índice Global de Innovación (IGI) en el 2021 de países por nivel de ingresos

Ingresos altos	Posición general IGI	Ingreso medio alto	Posición general IGI	Ingreso medio bajo	Posición general IGI	Ingreso medio bajo	Posición general IGI
Suiza	1	China	12	Vietnam	44	Rwanda	102
Suecia	2	Bulgaria	35	India	46	Tajikistan	103
EEUU	3	Malasia	36	Ukrania	49	Malawi	107

Fuente: Elaboración propia (2022)

Los países con más ingresos destinan mayor porcentaje de su Producto Interno Bruto (PBI) a las actividades de ciencia tecnología e innovación. Tal es el caso de Suiza, Suecia y EEUU que destinaron el 3,37%, 3.34% y 2.84% respectivamente en el 2018, según lo indica el Banco Mundial (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2021).

De acuerdo a lo anterior, el índice de innovación de un país está determinado por una compleja interacción de factores económicos, sociales y tecnológicos. Los países desarrollados suelen contar con sistemas de innovación más sólidos, gracias a una mayor inversión en investigación y desarrollo, una mayor colaboración entre universidades y empresas, y políticas gubernamentales que fomentan la innovación. En los países en desarrollo, la capacidad de innovar está condicionada por factores como el tamaño de las empresas, el acceso a financiamiento, la infraestructura tecnológica y la demanda del mercado.

La creciente demanda de alimentos saludables, seguros y convenientes está impulsando la innovación en la industria alimentaria, lo que se traduce en el desarrollo de nuevas tecnologías de procesamiento y conservación de alimentos, así como en la creación de productos más personalizados y adaptados a las necesidades de los consumidores.

Los avances en investigación han permitido identificar una amplia gama de tecnologías aplicables a la producción y conservación de alimentos. Estas tecnologías pueden clasificarse según su nivel de desarrollo en tres categorías principales: maduras, emergentes y en desarrollo.

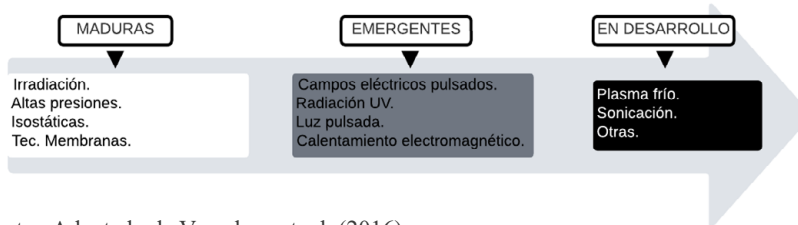
Tecnologías maduras. Se definen como aquellas tecnologías que, aunque no han tenido uso generalizado sus antecedentes científicos se comprenden y sus fallas y problemas se han eliminado o disminuido considerablemente durante su período de desarrollo (Engo et al., 2015).

Tecnologías emergentes. Son aquellas tecnologías que no han alcanzado su máximo nivel de desarrollo y son caracterizadas por ser innovadoras y proporcionar mejoras frente a tecnologías tradicionales.

Tecnologías en desarrollo. Son aquellas tecnologías las cuales se verifica el uso de los conocimientos científicos existentes para su mejora o para el desarrollo de prototipos y plantas piloto (Engo et al., 2015).

Como puede observarse en la siguiente figura el desarrollo tecnológico, la automatización junto con necesidades de mercado han permitido la evolución de investigaciones en nuevas formas de desarrollo de la Ciencia y Tecnología de alimentos. Vaugdana et, al. (2016) clasifican las tecnologías emergentes según su nivel de desarrollo así:

Figura 1
Clasificación de las tecnologías emergentes según su nivel de desarrollo.



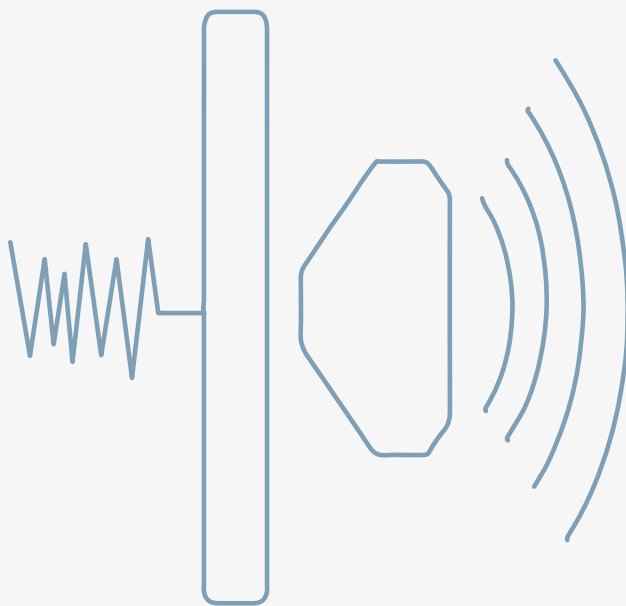
Fuente: Adaptado de Vaugdana et, al. (2016)

Bibliografía

- Alzate, C. E. O. (2003). *Procesamiento de alimentos*. Univ. Nacional de Colombia.
- CEPAL, N. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Objetivos, metas e indicadores mundiales* (CEPAL (ed.)). (LC/G.2681-P/Rev.3). <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40155-la-agenda-2030-objetivos-desarrollo-sostenible-oportunidad-america-latina-caribe>
- Díaz, J. Á. M., & Moreno, Á. S. H. (2017). *Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas*. UTC.
- Domínguez, L., & Parzanese, M. (2011). Luz ultravioleta en la conservación de alimentos. *Alimentos Argentinos*, 52(2), 70–76.
- Dutta, S., Lanvin, B., León, L. R., & Wunsch-Vincent, S. (2021). *Global innovation index 2021: tracking innovation through the covid-19 crisis*. WIPO.
- Engo, N., Fuxman, A., Gonzalez, C. B., Negri, L., Polenta, G. A., & Vaudagna, S. R. (2015). *Desarrollo de las exigencias sobre calidad e inocuidad de alimentos en el mundo (2025)*.
- FAO, FIDA, OMS, P. y U. (2022). *Versión resumida de El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2022. Adaptación de las políticas alimentarias y agrícolas para hacer las dietas saludables más asequibles*. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cc0640es>
- Fernández, M., & Hierro, E. (2016). Pulsos de luz: una nueva tecnología para la higienización de los alimentos listos para el consumo. *Actas de La Real Academia Española de Ciencia Veterinarias*.
- Figuroa-Sepúlveda, K., Castillo-Robles, N.-Z., & Martínez-Girón, J. (2021). Aplicación de altas presiones y otras tecnologías en frutas como alternativa de tratamientos térmicos convencionales. In *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* (Vol. 19, pp. 271–285). scieloco.

- Fontal, B., Suárez, T., & Reyes, M. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. *Escuela de La Ingeniería*, 1, 24.
- Gobierno de Colombia. (2019). *Misión de sabios Colombia 2019*.
- Guterres, A. (2020). Estudio emblemático de la ONU muestra la aceleración del cambio climático en la tierra, el mar y la atmósfera. *Noticias ONU*, 1. <https://www.who.int/es/news/item/12-07-2021-un-report-pandemic-year-marked-by-spike-in-world-hunger#:~:text=Aunque todav%F3a%F1a no se ha,hasta 811 millones de personas>
- Jermann, C., Koutchma, T., Margas, E., Leadley, C., & Ros-Polski, V. (2015). Mapping trends in novel and emerging food processing technologies around the world. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 31, 14–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.06.007>
- OMS. (2022). *El a%F1o de la pandemia, dominado por un repunte del hambre mundial*.
- Pereda, J. A. O., Iglesias, M. J., Zurera-Cosano, G., & Carballeira, A. O. (2005). Aplicaci%F3n de radiaciones ionizantes a los alimentos. *Revista Del Comit%E9 Cient%F3fico de La AESAN*, 2, 11–44.
- PNUMA. (2021). *ONU: se desperdicia 17% de todos los alimentos disponibles a nivel del consumidor*.
- Purcell, E. M. (2001). *Electricidad y magnetismo* (Vol. 2). Revert%E9.
- Robles-Ozuna, L. E., & Ochoa-Mart%F3nez, L. A. (2012). Ultrasonido y sus aplicaciones en el procesamiento de alimentos. *Revista Iberoamericana de Tecnolog%F3a Postcosecha*, 13(2), 109–122.
- UNESCO. (2021). *Gasto en investigaci%F3n y desarrollo (% del PIB)*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/GB.XPD.RSDV.GD>.
- Valdivia-N%F3jar, G. (2020). *tecnolog%F3as emergentes y su aplicaci%F3n en alimentos*. <https://suplementocampus.com/tecnologias-emergentes-y-su-aplicacion-en-alimentos/>
- Vaudagna, S. R., Szerman, N., & Barrio, Y. X. (2016). *Tecnolog%F3as Emergentes de procesamiento*.

- Vivanco, D., Ardiles, P., Castillo, D., & Puente, L. (2021). Tecnología emergente: Campo de pulsos eléctricos (PEF) para el tratamiento de alimentos y su efecto en el contenido de antioxidantes . In *Revista chilena de nutrición* (Vol. 48, pp. 609–619). scielocl .
- Wilches, R. S. (2015). Tecnologías no térmicas en el procesado y conservación de alimentos vegetales. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 2(1), 73–82.



CAPÍTULO II

Ultrasonido

Principios y aplicaciones

Con la colaboración de:

Victor Manuel Gélvez Ordoñez

 <https://orcid.org/0000-0001-5804-9585>

Edwin Alberto Murillo Ruiz

 <https://orcid.org/0000-0002-6856-7690>

Yesenia Campo Vera

 <https://orcid.org/0000-0003-4658-8113>



CAPÍTULO II

ULTRASONIDO

Objetivo

El objetivo de este capítulo es presentar los conceptos, efectos y aplicación del ultrasonido en las matrices alimentarias.

Definición y fundamento

Dimensión y nomenclatura

En el Sistema Internacional (SI) la unidad de medida del ultrasonido es el Hertz (Hz) equivalente a la frecuencia de un fenómeno periódico cuyo período es 1 ciclo por segundo.

Para representar valores grandes de frecuencia se utilizan múltiplos decimales de la unidad básica (Tabla 3).

Tabla 3

Nomenclatura de la unidad de medida del ultrasonido según el SI

Múltiplo	Equivalencia (Hz)	Abreviatura en español
KiloHertz	1.000	kHz
Mega Hertz	1.000.000	MHz
Giga Hertz	1.000.000.000	GHz

Fuente: Elaboración propia (2022)

Definición y clasificación

Según Hoover (2000) y Mason (1990), los ultrasonidos son ondas mecánicas con una frecuencia superior a los 16 kHz, el límite superior

de la audición humana. Estas ondas vibran a una velocidad de 20.000 o más ciclos por segundo. El ultrasonido se destaca como una tecnología limpia y eficiente, que permite conservar las propiedades naturales de los alimentos y mejorar la transferencia de masa, según lo reportado por Bhat et al. (2021).

La manera más común de clasificar el ultrasonido es de acuerdo a su intensidad. De esta manera encontramos la siguiente clasificación:

Tabla 4
Clasificación del ultrasonido según su intensidad y aplicación

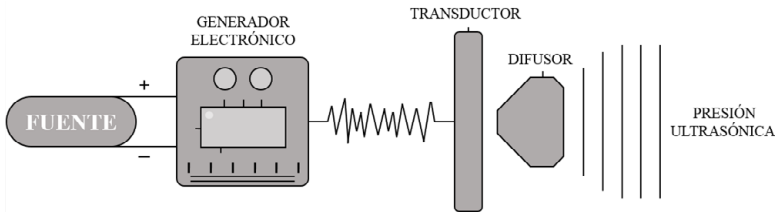
Villamiel & de Jong, 2000		Objetivo	Povey & Mason, 1998	
Clasificación	Rango de intensidad		Frecuencia	Energía
Baja intensidad	$\leq 1 \text{ W/cm}^2$	Obtener información del medio de propagación.	Alta (MHz)	Baja
Elevada intensidad	$\geq 1 \text{ W/cm}^2$	Producir cambios en el medio tratado.	Baja KHz)	Alta

Fuente: Elaboración propia (2022)

Generación de ultrasonido

La generación de ultrasonido se basa en la deformación de un material piezoeléctrico mediante un campo eléctrico de alta frecuencia. Esta deformación produce ondas mecánicas longitudinales que se propagan a través de un medio transmisor. Para ser considerado ultrasonido, la frecuencia de estas ondas debe superar los 20 kHz, límite superior de la audición humana (Vargas et al., 2008).

Figura 2
Esquema de un generador de ultrasonido.

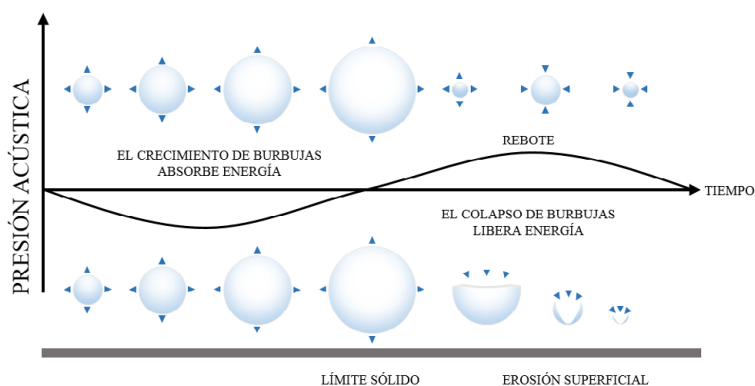


Fuente: Adaptado de Ávila (2020)

De acuerdo con Wu et al. (2020), la energía acústica generada por un transductor ultrasónico se disipa a través de dos mecanismos principales: propagación y cavitación. La energía de propagación se transmite a través del medio, transformándose gradualmente en calor. Por otro lado, la energía de cavitación se concentra en la formación, crecimiento y colapso de burbujas de vapor, liberando energía en forma de calor, luz, y fuerzas mecánicas.

En la siguiente figura muestra la transformación de energía durante el proceso de cavitación. Se puede observar cómo la burbuja absorbe energía a medida que crece y una vez explota esta energía es liberada. Por lo tanto, las burbujas de cavitación son consideradas como acumuladores de energía. La cavitación, un fenómeno caracterizado por la formación, crecimiento y colapso violento de burbujas en un líquido, juega un papel fundamental en muchas aplicaciones de los ultrasonidos. La energía acumulada en las burbujas durante su crecimiento se libera de forma explosiva en el colapso, generando condiciones extremas de presión y temperatura. Estas condiciones extremas son aprovechadas en procesos como la limpieza, la emulsificación y la desinfección, donde la cavitación induce cambios físicos y químicos en los materiales.

Figura 3
Esquema de la generación del fenómeno de cavitación.

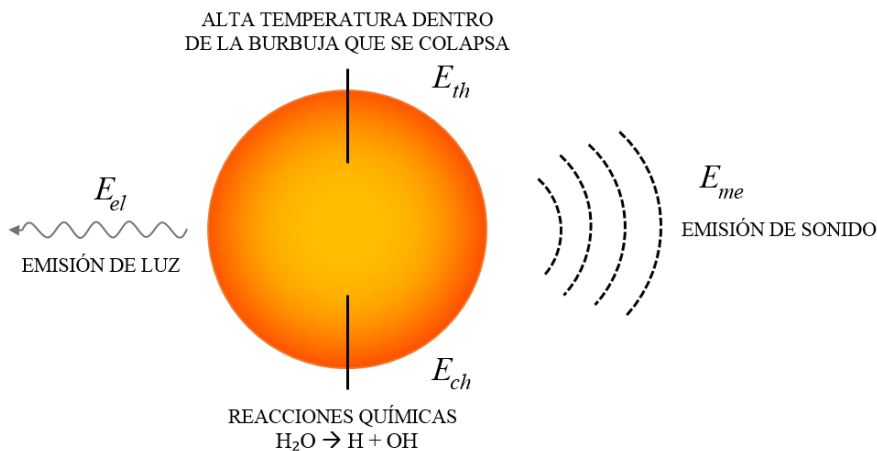


Fuente: Adaptado de Wu et al. (2020).

Efecto de la aplicación de ultrasonido

Se ha encontrado que la aplicación de ultrasonido produce diferentes tipos de efectos y que estos efectos están determinados en muchos casos por la intensidad y el tiempo de aplicación. Como se puede observar en la Figura 4, de manera general el ultrasonido produce efectos en la temperatura, reacciones químicas y emisiones de sonido y luz.

Figura 4
Esquema del efecto del ultrasonido.



Fuente: Tomado de Wu et.al. (2020)

La siguiente tabla muestra los principales efectos de la aplicación de ultrasonido que han sido estudiados.

Tabla 5
Efectos de la aplicación de ultrasonido en alimentos

Cambios	Fenómeno	Efecto	Valor alcanzado	Referencia
Físicos	Implosión de burbujas.	Aumento de la temperatura.	5000 K	Reyes-Cruz et al., (2016)
	Cambios de presión.	Generación de alta presión.	30 - 120 MPa	Reyes-Cruz et al., (2016)

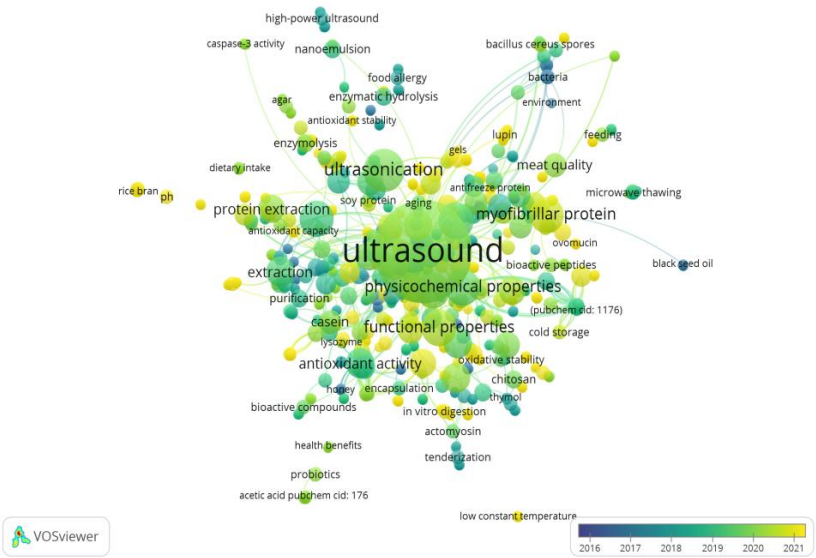
	Producción de plasma.	Sonoluminiscencia.	Intensidades máximas de 1-10 mW.	(Urteaga, 2008)
Químico	Rompimiento de enlaces covalentes.	Formación de radicales.	$H\cdot$ y $\cdot OH$	(Ashokkumar, 2011)
	Oxidación de sulfhidrilo libres.	Formación de enlaces disulfuro.	-S=S-	(Ashokkumar et al., 2008)
	Cambios en la estructura secundaria.	Aumento o disminución de los comportamientos de hélice α , pliegue β , giro β y enrollamiento aleatorio de cadenas peptídicas.	Despliegue o reordenamiento de moléculas	(Kang et al., 2021) (Jia et al., 2010)

Fuente: Elaboración propia (2022)

Estado del arte

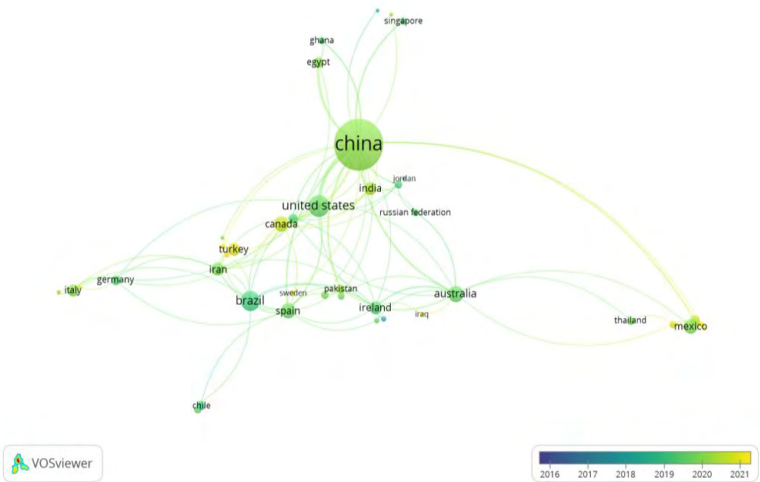
En actualidad se ha verificado que existen estudios acerca del uso del ultrasonido principalmente para la conservación de alimentos. A continuación, se presentan los estudios más relevantes en los últimos cinco años según el estudio bibliométrico realizado con el software Vosviewer, utilizando las palabras clave de autores. Los resultados demuestran un creciente interés en el uso de ultrasonidos en el sector alimentario. Si bien la conservación de alimentos ha sido un foco tradicional, las investigaciones actuales exploran una gama más amplia de aplicaciones, incluyendo el desarrollo de nuevos productos, la modificación de estructuras alimentarias y la optimización de procesos. China y Estados Unidos lideran esta tendencia investigativa. (Figura 5 y Figura 6).

Figura 5
Investigaciones de efectos de ultrasonido por palabras clave en el periodo 2016 a 2022.



Fuente: Elaboración propia (2022)

Figura 6
Investigaciones de efectos de ultrasonido por países en el periodo 2016 a 2022.



Fuente: Elaboración propia (2022)

Efectos en los componentes alimentarios

Como se mencionó anteriormente, el ultrasonido -a pesar de sus múltiples aplicaciones- continúa siendo objeto de intensa investigación y desarrollo. Aunque el ultrasonido cuenta con una amplia gama de aplicaciones, la investigación en este campo sigue siendo activa; lo que sugiere un gran potencial para futuras innovaciones. Es una tecnología que se considera eficiente y ecológica.

En la actualidad se ha estudiado su efecto en la modificación que puede provocar en los diferentes componentes de los alimentos.

Las proteínas son las moléculas que construyen y regulan los organismos. En los alimentos, además de aportar aminoácidos esenciales, estas influyen en características como el sabor, la textura y la apariencia. Estas propiedades funcionales dependen en gran medida de la estructura tridimensional de las proteínas, que puede verse alterada por factores como el pH, la temperatura y la fuerza iónica. Por ejemplo, un cambio en el pH puede desnaturalizar las proteínas, afectando su capacidad para formar geles y emulsiones. Comprender cómo estos factores influyen en la estructura y función de las proteínas es fundamental para el diseño de nuevos alimentos y la optimización de los procesos de elaboración (Chen et al., 2022; Lin et al., 2021; Wang et al., 2017).

Diversos estudios han reportado el efecto del ultrasonido en las proteínas y otros componentes alimentarios. Indicando que el tratamiento con ultrasonido de alta intensidad presenta diferentes efectos y que estos dependen de la matriz alimentaria sometida a tratamiento. A continuación, se presentan estudios realizados, se indican las condiciones de tratamiento, las variables estudiadas y las posibles causas que inciden en los cambios.

Gülseren et al. (2007) evaluaron el efecto del ultrasonido (20 W cm²/7 a 90 min/2 °C) sobre la estructura y propiedades funcionales de la seroalbúmina de bovino. Encontraron que la presión superficial, la actividad de la proteína, la susceptibilidad al tratamiento térmico, el potencial Z y la hidrofobicidad aumentan con el incremento del tiempo

de sonicación. El tratamiento con ultrasonido produce formación de agregados proteicos, disminución de los grupos sulfhidrilo y reordenamiento de la estructura secundaria de la proteína.

Gelvez-Ordoñez et al. (2009) estudiaron el efecto del tratamiento ultrasonido de alta frecuencia (40 kHz/80 W/ 0, 5, 10 y 15 min. / 20°C) sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales de las proteínas de la clara de huevos de gallina. Las muestras fueron almacenadas en refrigeración a 4°C durante 3 días. Encontraron que el pH no presentó cambios significativos ($P < 0,05$) por efecto del tratamiento. Por otro lado, encontraron que el tratamiento con ultrasonido durante 10 min aumentó la capacidad espumante en un 15,84 y 13,07%; pero la estabilidad de la espuma disminuyó en un 13,89 y 8,50%.

Lo anterior, debido a la orientación molecular resultado de la sonicación lo que produce cambio estructural de la molécula proteína aumentando el contenido helicoidal. Además, el tratamiento expone algunos de los grupos hidrofóbicos, lo que aumentaría la hidrofobicidad y la tasa de absorción. De igual manera los monómeros de proteínas con el tratamiento podrían formar dímeros con sus grupos tiol libres expuestos (Guzey et al., 2002; Hess et al., 1964; Jackson et al., 1996).

Campo y Gelvez (2011) evaluaron el efecto de los tratamientos con ultrasonido (40KHz/20, 40 y 60 °C/20, 40 y 30 min) sobre las propiedades fisicoquímicas del hongo comestible *Pleurotus ostreatus* fresco empacado al vacío y almacenado en refrigeración (5 ± 2 °C /15 días). Encontraron que la sinergia entre mayor tiempo y mayor temperatura de tratamiento disminuyen la luminosidad y el parámetro a, mientras que el pH aumenta. Así mismo, indicaron que el tratamiento con US a 40 °C/ 20 min produce mejor efecto inhibitoria en la producción de polifenoloxidasas (PFO). Los cambios reportados fueron atribuidos a las altas presiones, fuerza interna, formación de iones y altas temperaturas generadas por la cavitación en el material vegetal durante el tratamiento con US (Lee, 2002).

Romero y Gelvez (2013) evaluaron el efecto del tratamiento con ultrasonido (US/37 kHz/ 3, 5 y 10 min/16 °C) sobre la microbiota (mesófilos, coliformes totales y fecales), el pH y la estabilidad de

una emulsión (EE) elaborada con carne de búfalo (*Bubalus bubalis*). Encontraron reducción de mesófilos en 1, 32 unidades logarítmicas de UFC/g en la muestra tratada durante 10 minutos; 1 unidad logarítmica de NMP/g de coliformes totales en la muestra tratada durante 5 minutos y 0, 69 unidades logarítmicas de NPM/g recuento de coliformes fecales en las muestras tratadas durante 5 min. El pH disminuyó significativamente en todas las muestras, mientras que la EE aumentó en las muestras tratadas durante 3 min. Estos resultados son atribuidos a altas presiones y temperaturas de la cavitación, la cual genera radicales libres (hidrogeniones), cambio en la estructura helicoidal de la proteína, sonólisis e incremento de iones hidronio, liberación de sustancias, disminución del tamaño de partículas, destrucción del límite de la fase de líquidos inmiscibles, despolimerización y homogenización (Abismail et al., 1999; Güzey, 2002; Jambrak et al., 2008; Mason et al., 1996; Masudo & Okada, 2002; Varnam et al., 1995).

Gelvez, et al. (2015) estudiaron el efecto del US (40 KHz / 40, 50 y 60 °C/ 15 y 30 minutos) sobre la digestibilidad *in vitro*, por un sistema trienzimático (tripsina, quimotripsina y peptidasa), de las proteínas de la harina de trigo. Determinaron que la digestibilidad aumentó a $85,92 \pm 0,11\%$ en las muestras tratadas a 40 KHz / 50°C/15 min elevando su valor y calidad nutricional. El resultado fue atribuido al fenómeno de cavitación causado por el US que aumenta la temperatura de las proteínas desnaturalizándolas y mejorando la digestibilidad (López-Ferrer et al., 2005; Moulton & Wang, 1982; Postema et al., 2004).

Luna Granados (2016) evaluó el efecto de la termosonicación (40 KHz a 40, 50 y 60°C durante 15 y 30 min) sobre las propiedades térmicas y digestibilidad *in vitro* de las proteínas de arroz. Encontró aumento significativo de la digestibilidad solo en las muestras tratadas a 40 KHz a una temperatura de 40°C durante 15 y 30 minutos (82 y 82,14% , respectivamente) lo cual fue atribuido a presión generada en la cavitación la que causa ruptura por el esfuerzo mecánico sobre las superficies sólidas, penetra en los poros moleculares y aumenta la liberación de péptidos; los cuales permiten la salida de enzimas facilitando la digestión de proteica (Lopez-Ferrer et al., 2005; Postema et al., 2004; Wibetoe et al., 1999). En las propiedades térmicas encontraron que la entalpía de

gelatinización aumentó en algunas muestras sometidas a tratamiento, comportamiento que fue atribuido a que la termosonicación produce cambios en la estructura de la molécula de almidón, lo que produce en las variaciones en las propiedades fisicoquímicas y su funcionalidad.

Las fuerzas de cizalla violentas producidas por la cavitación distorsionan la región cristalina de los gránulos y las cadenas del polímero se rompen en los enlaces C-C macromoleculares formando radicales de cadena larga. Mejorando la capacidad de absorción de agua, mayor potencia hinchazón y mayor solubilidad (Majzoobi et al., 2015).

Fuentes et al. (2016) evaluaron el efecto del US (37 KHz/25Wcm-2/0, 3, 4 y 5 min) sobre el pH, el perfil de textura y el color en la carne de lomo de atún (*Thunnus albacores*). Encontrando que no existe un patrón lineal de comportamiento del pH, es decir a menor y mayor tiempo de tratamiento no hay efecto del tratamiento, mientras que a 4 min existe aumento significativo. En la textura el tiempo de tratamiento disminuye la dureza, la elasticidad y la masticabilidad. En cuanto al color se presentó disminución del parámetro L (Luminosidad) y el parámetro b (amarillo-azul). Estos resultados fueron atribuidos a los daños a la estructura celular, liberación de iones, cambios en la conformación de proteínas (Jayasooriya et al., 2007).

Wu et al. (2018) determinaron el efecto de la intensidad (0, 100, 200, 300, 400 y 500 W /15 min/25 °C) y el tiempo (0, 5, 10, 15, 20, 25 min) de pretratamiento con ultrasonido sobre las proteínas del suero de leche de vaca. Encontraron que el grado de hidrólisis aumenta con los dos parámetros hasta cierto valor de los mismos, después decrece. Además, reportaron un aumento de la cantidad de sulfihidrilos libres y la hidrofobicidad. Dichos cambios fueron atribuidos los efectos del ultrasonido sobre las moléculas de proteína tales como: la ruptura, el despliegue el cual que permite la exposición de los grupos SH, y los desarreglos que destruyen las interacciones hidrológicas causando la exposición de sus grupos (Jia et al., 2010 y Wang et al., 2017).

Torres et al. (2019) evaluaron el efecto del tratamiento con ultrasonido (37 kHz/ 60, 120, 240 s a temperatura/30°C) sobre el pH, la estabilidad

y la textura de emulsiones preparadas con carne de búfalo y reportaron que el pH de las muestras tratadas durante 3 y 5 disminuye mientras que con 10 min no presenta diferencia significativa (significancia del 5%). Además, se observaron aumento de la estabilidad y reducción progresiva de la dureza y masticabilidad de la emulsión con el aumento del tiempo de exposición. Estos resultados fueron atribuidos al efecto de las altas presiones y temperaturas producidas en la cavitación, la generación de radicales libres (hidrogeniones), cambios en la estructura helicoidal de la proteína y descomposición del agua aumentando la concentración de iones hidronio y por tanto disminución del pH. Así mismo, al rompimiento de las estructuras por efecto del tratamiento permitiendo la liberación proteica e influyendo en la capacidad de ligazón, agregación y estabilización (O'Sullivan et al., 2016 y Zhang et al., 2014).

Torres et al. (2019) desarrollaron una bebida a base de flor de Jamaica pretratada con US (40 KHz/130 W/30°C/10 min) endulzada con estevia (3%) y enriquecida con cristales de aloe vera (20%). Encontraron que, con el pretratamiento con US, el pH disminuye y por tanto aumenta la acidez por efecto de la cavitación, además permite mejorar las características organolépticas al aumentar la extracción de pigmentos (Porrás et al., 2011).

Gelvez et al. (2021) evaluaron el efecto de la termosonicación (40 KHz/100W/ 0, 20, 40, 60°C/25 min en las propiedades fisicoquímicas, la cantidad de vitamina C y la actividad enzimática de la Peroxidasa (PO) y Polifenoloxidadada (PPO) de la pulpa de guanábana. Encontraron que el pH disminuye la pérdida de vitamina C y la inactivación de las enzimas es proporcional al aumento de la temperatura en el tratamiento. Dichos cambios fueron atribuidos al rompimiento de enlaces hidroxilo (OH-), rompimiento de las paredes celulares, formación de radicales (OH- y H+), hidrolisis y reacciones de decarboxilación, reagrupamiento y ciclización causada por la cavitación (Campo & Gélvez, 2011; Ulloa et al., 2013; Avalos et al., 2015; Ordóñez-Santos et al., 2017).

Deli et al. (2022) determinaron los efectos de la termosonicación (24KHz/25 a 65 °C/0,1 a 30 min) en el color, contenido fenólico, inactivación del Ácido Ascórbico (AA) y la Polifenoloxidadada (PPO) en la

producción de néctar de marañón. Encontraron que se puede alcanzar una inactivación de la PPO en un 96% a condiciones de 65°C y 598 J/g de densidad ultrasónica. El contenido de fenoles totales aumenta 466,6 mg/L con la intensidad del ultrasonido y la temperatura (56,9 °C y 477 J/g). Por su parte, el contenido de AA aumentó a alta temperatura e intensidad de ultrasonido constante (65 °C y 350 J/g); no encontraron cambios significativos en el color debidos a la aplicación de ultrasonido y el contenido de ácido ascórbico es mayor a alta temperatura y US constante. Mientras que la cantidad de polifenoles totales se incrementa con el aumento de la intensidad del ultrasonido. Los fenómenos descritos fueron atribuidos a la desnaturalización de proteínas debida a la posible oxidación de enzimas por los radicales libre producidos por el rompimiento de los enlaces de Van der Waals y de hidrógeno durante la sonólisis del agua; a liberación de pigmentos por ruptura de la pared celular por efecto de la cavitación generada tras la aplicación de ultrasonido (Anaya-Esparza & Velázquez-Estrada, 2017; Vercet et al., 2001).

Zhao et al. (2022) investigaron el efecto del tratamiento con ultrasonido (potencia de 150, 300, 450, 600 and 750 W durante 20 min a intervalos de 2 seg) en las características fisicoquímicas (tamaño de partícula, color, hidrofobicidad, contenido de sulfhidrilos), estructurales, propiedades funcionales (solubilidad, capacidad de retención de agua, índice y capacidad de emulsificación, índice y capacidad de espumado, Termogravimetría) de la proteína extraída de perilla y las emulsiones preparadas con esta proteína pretratada con ultrasonido. Encontraron que el tamaño de partícula disminuyó con el aumento de la potencia del US causando la disrupción de enlaces no covalentes por lo tanto la desagregación de cadenas protéicas (Zou et al., 2020). Por su parte, el cambio de color fue atribuido a que el tratamiento con US destruye los tejidos de proteína y causa la remoción de los pigmentos contenidos en esta (López et al., 2018).

La hidorofobicidad superficial y el contenido de grupos sulfhidrilo aumentaron con el aumento de la potencia del US debido a la cavitación podría debilitar los enlaces intermoleculares y los puentes de hidrógeno lo que llevaría a la exposición de grupos hidrofóbicos contenidos en la

proteína. Además, la cavitación junto con la fuerza de las ondas expone y rompe los enlaces S-S produciendo disminución del tamaño de partícula y aumento de los grupos -SH libres (Gharibzahedi & Smith, 2020).

Otro fenómeno atribuido a la cavitación fue la disrupción de enlaces no covalentes produciendo la formación de una red proteica; el despliegue parcial de la estructura interna liberando triptófano generando cambios en la conformación y la estructura secundaria y terciaria aumentando la capacidad hidrofílica, la solubilidad, la capacidad emulsificante, estabilidad de las emulsiones, capacidad de espumado, capacidad de retención de agua y aceite, índice de cremado, y produciendo menor tamaño las gotas de grasa y mayor porcentaje de adsorción de proteína en las emulsiones (Cui et al., 2021; Kamani et al., 2021; Li et al., 2021; Ma et al., 2019; Suppavorasatit et al., 2011; Valdez-Hurtado et al., 2019; Wang et al., 2020).

Gao et al. (2023) investigaron el efecto sinérgico de la aplicación de ultrasonido de alta intensidad (HIU, 120-240 W), el tiempo de tratamiento (0-30 min) y la concentración de sal (0-3,0 %) sobre los geles de surimi. Encontraron que a menor concentración de sal > tiempo HIU > potencia HIU, el perfil de textura mejoró debido a que el HIU promueve la formación de enlaces covalentes, las interacciones proteína-agua, la presión capilar por lo tanto la formación de microestructuras más densas que aumentan la capacidad de retención reduciendo la movilidad del agua libre y las pérdidas por cocción (Liang et al., 2020 y Liu et al., 2021).

Campo et al. (2023) evaluaron el efecto del tratamiento con ultrasonido (40, 60 y 80kHz/ 30min) en la extracción del aceite crudo de palma. Encontraron que el tratamiento US a una frecuencia de 40kHz/30min aplicado previo a la clarificación incrementa el rendimiento en 19.35%, disminuye significativamente la humedad y acidez elevando sus atributos de calidad. Este efecto es debido a la frecuencia ultrasónica la cual es igual a la frecuencia intrínseca de la burbuja de cavitación que genera una amplitud de oscilación de la burbuja más grande y con mayor intensidad, el tamaño de la burbuja crece antes de colapsar.

Además, el intervalo de tiempo entre la compresión y la refracción de la solución aumenta mejorando la intensidad de la cavitación y la transferencia de masa. Por otro lado, la cavitación degrada el oxígeno disuelto y produce la microevaporación del agua por las altas temperaturas y presiones generadas; lo cual trae como consecuente la concentración del ácido (Campo Vera & Gélvez, 2011; Carrillo Lopez et al., 2021; Merouani et al., 2015; Zhang et al., 2017;).

Guo et al. (2023) investigaron el efecto del tratamiento con ultrasonido (20 kHz/ 0, 100, 200, 300 y 400 W/20°C/10 min) sobre los cambios en las propiedades estructurales y funcionales de las proteínas de salvado de arroz japónica (*Oryza sativa subsp. Japonica*) mezclado con catequina. Encontraron que la estructura secundaria de las proteínas fue modificada (mayor contenido de α -hélice, hoja β y combinaciones al azar y bajo contenido de giro β). Además, se observó disminución de los grupos sulfidrilos, mayor tamaño de partícula, mayor densidad protéica (potencial Z), mayor capacidad de retención de agua y aceite, mayor capacidad emulsificante y estabilidad de la emulsión, al igual que la actividad antioxidante.

Lo anterior fue atribuido a: Rompimiento y despliegue de estructuras, exposición de grupos hidrofóbicos, exposición de compuestos, incremento de la polaridad, incremento de enlaces covalentes, cambios en la conformación espacial de las proteínas, aumento del área de superficie proteica y sitios de lipofílicos de unión de grasas e hidrofílicos para la unión de agua, rompimiento o dispersión de enlaces no covalentes que mantienen unida la proteína, formación de enlaces covalente entre cadenas laterales de las proteínas y anillos aromáticos, reacciones entre radicales libres y protones producidos por aminoácidos; causados por la cavitación y la fuerza mecánica inducidos por del tratamiento con ultrasonido (Li et al., 2016; Li et al., 2020; Meng et al., 2021; Stanic-Vucinic et al., 2013 Tong et al., 2022;; Zhang et al., 2022; Zhang et al., 2022).

Ma et al. (2019) evaluaron la influencia del pretratamiento de leche cruda, para la producción de queso Minas Frescal, con termosonicación (20 kHz/ 160, 400, y 640 W/ 72-75°C/15 min). Evaluaron el efecto del tratamiento en el comportamiento microbiano, los compuestos bioactivos, el color y

la reología de los productos. Encontraron que el tiempo en alcanzar la temperatura de procesamiento se reduce en 47.5% efecto producido por el colapso de las burbujas durante la cavitación (Meroni et al., 2022).

En los quesos elaborados con leche pre-tratada el contenido de humedad disminuyó y el contenido de proteína aumentó debido a que el tratamiento con US afecta el tamaño de partícula (micelas de caseína y glóbulos de grasa), aumenta la hidrofobicidad, expone grupos sulfhidrilos y aumenta la capacidad de gelificación (Killeit, 2021b; Shokri et al., 2022). Por otro lado, el tratamiento produjo reducción de las bacterias mesófilas aerobias totales, psicotróficas y ácido lácticas entre 2,22 - 2,35; 3,30 - 3,85 y 3,60 - 3,65 log CFU g⁻¹ respectivamente; dicha reducción fue atribuida a la cavitación la cual provoca daños subletales por la ruptura celular que producen las fuerzas físicas generadas en el colapso de las burbujas.

De igual manera, la cavitación produce radicales hidroxilo que reaccionan con los constituyentes celulares produciendo disminución del crecimiento celular (Cichoski et al., 2015; Halpin et al., 2014; Noci et al., 2009). Por su parte, el estudio del color reveló aumento de la luminosidad en las muestras tratadas, por lo tanto, se observó aumento del índice de blancura lo cual fue atribuido a que la termosonicación produce degradación de carotenoides y las temperaturas de tratamiento no desencadena reacciones de Maillard (Kutlu et al., 2022; Ragab et al., 2019). En el perfil de textura las muestras sometidas a termosonicación presentaron mayor fragilidad debido al debilitamiento en los enlaces intermoleculares de la red de proteínas producido por el tratamiento. Los compuestos bioactivos (actividad antioxidante, ACE: Enzima convertidora de angiotensina, α -amilasa. α -g: α -glucosidasa) también presentaron valores significativamente superiores; dicho comportamiento fue favorecido por la disrupción de las células tras los efectos del colapso de las burbujas de cavitación la cual causan su liberación y la hidrólisis proteica con la consecuente inhibición o protección de enzimas (Cappato et al., 2018; Martinez-Gonzalez et al., 2019; Oliveira et al., 2022).

Bibliografía

- Abismail, B., Canselier, J. P., Wilhelm, A. M., Delmas, H., & Gourdon, C. (1999). Emulsification by ultrasound: drop size distribution and stability. *Ultrasonics Sonochemistry*, 6(1-2), 75-83. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(98\)00027-3](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(98)00027-3)
- Anaya-Esparza, L., & Velázquez-Estrada, R. (2017). Efecto de la termosonicación en la inactivación de polifenol oxidasa y parámetros de calidad del néctar de guanábana. *LWT*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643816305965>
- Ashokkumar, M. (2011). The characterization of acoustic cavitation bubbles—an overview. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 864-872.
- Ashokkumar, M., Sunartio, D., Kentish, S., Mawson, R., Simons, L., Vilkuh, K., & Versteeg, C. K. (2008). Modification of food ingredients by ultrasound to improve functionality: A preliminary study on a model system. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(2), 155-160.
- Avalos, F. R., Azahuanche, F. R. P., Arquíño, M. J. O., Barraza, G., Jáuregui, M. V. T., & Horna, A. C. F. (2015). *Efecto del tiempo de exposición al ultrasonido sobre las características fisicoquímicas, reológicas y microbiológicas en la pulpa de "chirimoya" Annona cherimola Mill. (Annonaceae)*. Arnaldoa.
- Avila Perona, E. (2020). *Ultrasonido principios básicos*. Ultrasonico: Principios Físicos. http://dea.unsj.edu.ar/cea1/ima_ultrasonido.pdf
- Bhat, Z. F., Morton, J. D., Bekhit, A. E. D. A., Kumar, S., & Bhat, H. F. (2021). Emerging processing technologies for improved digestibility of muscle proteins. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 226-239. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.02.010>
- Campo Vera, Y., & Gélvez, V. M. (2011). Efecto de la termosonicación sobre las propiedades fisicoquímicas del hongo comestible (*Pleurotus ostreatus*) fresco empacado al vacío. *Bistua: Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 9(2), 55-63.

- Cappato, L. P., Ferreira, M. V. S., Moraes, J., Pires, R. P. S., Rocha, R. S., Silva, R., Neto, R. P. C., Tavares, M. I. B., Freitas, M. Q., & Rodrigues, F. N. (2018). Whey acerola-flavoured drink submitted Ohmic Heating: Bioactive compounds, antioxidant capacity, thermal behavior, water mobility, fatty acid profile and volatile compounds. *Food Chemistry*, 263, 81–88.
- Chen, W., Ma, H., & Wang, Y.-Y. (2022). Recent advances in modified food proteins by high intensity ultrasound for enhancing functionality: Potential mechanisms, combination with other methods, equipment innovations and future directions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 85, 105993. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105993>
- Cichoski, A. J., Rampelotto, C., Silva, M. S., De Moura, H. C., Terra, N. N., Wagner, R., De Menezes, C. R., Flores, E. M. M., & Barin, J. S. (2015). Ultrasound-assisted post-packaging pasteurization of sausages. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 30, 132–137. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.04.011>
- Cui, Q., Wang, L., Wang, G., Zhang, A., Wang, X., & Jiang, L. (2021). Ultrasonication effects on physicochemical and emulsifying properties of *Cyperus esculentus* seed (tiger nut) proteins. *LWT*, 142, 110979. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110979>
- Deli, M. G. E. P., Kirit, B. D., Ağçam, E., & Akyıldız, A. (2022). The effects of thermosonication on quality parameters of cashew apple nectar: An optimization study for processing conditions. *Applied Food Research*, 2(2), 100217. <https://doi.org/10.1016/J.AFRES.2022.100217>
- Fuentes, L., Acevedo, D., & Gélvez, V. M. (2016). Efecto del Ultrasonido y Campos Magnéticos en la carne de lomo Atún (*Thunnus albacares*). *Información Tecnológica*, 27(2), 21–30.
- Gao, X., You, J., Yin, T., Xiong, S., & Liu, R. (2023). Simultaneous effect of high intensity ultrasound power, time, and salt contents on gelling properties of silver carp surimi. *Food Chemistry*, 403, 134478. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.134478>

- Gelvez-Ordóñez, V. . M., Mendoza-Galvis, F., & Delgado, J. O. (2009). Efecto del tratamiento con ultrasonido sobre algunas propiedades funcionales de la clara de huevo. *Revista Científica de La Facultad de Ciencias Veterinarias*, 19(1), 71–77. <https://n9.cl/qs41ih>
- Gelvez Ordóñez, V., López Castilla, I., & Ordóñez Santos, L. (2021). Effect of thermosonication on enzymatic oxidation and physicochemical properties of sour sop (*Annona muricata*) pulp. *Revistas.Uncu.Edu.Ar*, 53(2), 252–260. <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/3146>
- Gelvez Ordoñez, V. M., Luna, N. J., & Vera Yesenia, C. (2015). Efecto del ultrasonido en la digestibilidad in vitro de las proteínas contenidas en la harina de trigo. *Bistua: Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 13(1).
- Gharibzahedi, S. M. T., & Smith, B. (2020). The functional modification of legume proteins by ultrasonication: A review. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 98, pp. 107–116). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.002>
- Gülseren, İ., Güzey, D., Bruce, B. D., & Weiss, J. (2007). Structural and functional changes in ultrasonicated bovine serum albumin solutions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14(2), 173–183.
- Guo, Y., Wang, M., Xing, K., Pan, M., & Wang, L. (2023). Covalent binding of ultrasound-treated japonica rice bran protein to catechin: Structural and functional properties of the complex. *Ultrasonics Sonochemistry*, 93, 106292. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2023.106292>
- Güzey, D. (2002). *Modificación de la estructura y funcionalidad de las proteínas mediante ultrasonidos de alta intensidad*. https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/2379/
- Güzey, D., Bruce, B. D., & Weiss, J. (2002). Modeling of the Adsorption Kinetics of Ultrasonically-Treated Bovine Serum Albumin. In *Annual Meeting and Food Expo*, session 30D. <https://n9.cl/wp0tv>

- Halpin, R. M., Duffy, L., Cregenzán-Alberti, O., Lyng, J. G., & Noci, F. (2014). The effect of non-thermal processing technologies on microbial inactivation: An investigation into sub-lethal injury of *Escherichia coli* and *Pseudomonas fluorescens*. *Food Control*, *41*, 106–115.
- Hess, E. L., Chun, P. W. L., & Crowley, R. L. (1964). Sonic energy effects in bovine serum albumin solutions. *Science*, *143*(3611), 1176–1177. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.143.3611.1176>
- Hoover, D. G. (2000). Ultrasound. *Journal of Food Safety*, *65*(8), 93–95.
- Jackson, J. C., Bourne, M. C., & Barnard, J. (1996). Optimization of blanching for crispness of banana chips using response surface methodology. *Journal of Food Science*, *61*(1), 165–166. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.1996.TB14750.X>
- Jambrak, A. R., Mason, T. J., Lelas, V., Herceg, Z., Ljubic´herceg, I., & Ljubic´herceg, L. (2008). Efecto del tratamiento con ultrasonido sobre la solubilidad y las propiedades espumantes de las suspensiones de proteína de suero. *Journal of Food*. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.10.004>
- Jayasooriya, S. D., Torley, P. J., D'arcy, B. R., & Bhandari, B. R. (2007). Effect of high power ultrasound and ageing on the physical properties of bovine Semitendinosus and Longissimus muscles. *Meat Science*, *75*(4), 628–639.
- Jia, J., Ma, H., Zhao, W., Wang, Z., Tian, W., Luo, L., & He, R. (2010). The use of ultrasound for enzymatic preparation of ACE-inhibitory peptides from wheat germ protein. *Food Chemistry*, *119*(1), 336–342. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.06.036>
- Kamani, M. H., Semwal, J., & Meera, M. S. (2021). Functional modification of protein extracted from black gram by-product: Effect of ultrasonication and micronization techniques. *Lwt*, *144*, 111193. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111193>
- 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. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1767538>

Killeit, U. (2021a). Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties. In *Deutsche Lebensmittel-Rundschau* (Vol. 117, Issue 6). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417721000080>

Killeit, U. (2021b). Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties. In *Deutsche Lebensmittel-Rundschau* (Vol. 117, Issue 6). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417721000080>

Kutlu, N., Pandiselvam, R., Kamiloglu, A., Saka, I., Sruthi, N. U., Kothakota, A., Socol, C. T., & Maerescu, C. M. (2022). Impact of ultrasonication applications on color profile of foods. *Ultrasonics Sonochemistry*, 89, 106109. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106109>

Lee, D.-U. (2002). *Application of combined non-thermal treatments for the processing of liquid whole egg*.

Li, S., Yang, X., Zhang, Y., Ma, H., Liang, Q., Qu, W., He, R., Zhou, C., & Mahunu, G. K. (2016). Effects of ultrasound and ultrasound assisted alkaline pretreatments on the enzymolysis and structural characteristics of rice protein. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 20–28. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2015.11.019>

Li, T., Li, X., Dai, T., Hu, P., Niu, X., Liu, C., & Chen, J. (2020). Binding mechanism and antioxidant capacity of selected phenolic acid - β -casein complexes. *Food Research International*, 129, 108802. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108802>

Li, W., Yang, H., Coldea, T. E., & Zhao, H. (2021). Modification of structural and functional characteristics of brewer's spent grain protein by

- ultrasound assisted extraction. *LWT*, 139, 110582. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110582>
- Liang, F., Zhu, Y., Ye, T., Jiang, S., Lin, L., & Lu, J. (2020). Effect of ultrasound assisted treatment and microwave combined with water bath heating on gel properties of surimi-crabmeat mixed gels. *LWT*, 133, 110098. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.110098>
- Lin, D., Zhang, Q., Xiao, L., Huang, Y., Yang, Z., Wu, Z., Tu, Z., Qin, W., Chen, H., & Wu, D. (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, C., Li, W., Lin, B., Yi, S., Ye, B., Mi, H., Li, J., Wang, J., & Li, X. (2021). Comprehensive analysis of ozone water rinsing on the water-holding capacity of grass carp surimi gel. *LWT*, 150, 111919. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111919>
- Lopez-Ferrer, D., Capelo, J. L., & Vazquez, J. (2005). Ultra fast trypsin digestion of proteins by high intensity focused ultrasound. *Journal of Proteome Research*, 4(5), 1569–1574.
- López-Ferrer, D., Capelo, J. L., & Vázquez, J. (2005). Ultra fast trypsin digestion of proteins by high intensity focused ultrasound. *Journal of Proteome Research*, 4(5), 1569–1574. <https://doi.org/10.1021/PR050112V>
- López, D. N., Ingrassia, R., Busti, P., Wagner, J., Boeris, V., & Spelzini, D. (2018). Effects of extraction pH of chia protein isolates on functional properties. *LWT*, 97, 523–529.
- Luna Granados, N. Y. (2016). *Efecto de la termosonicación sobre las propiedades termicas y la digestibilidad de las harinas de arroz (paddy) y harina de trigo. (triticum durum)*. [Universidad de Pamplona]. <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/1087>
- Ma, W., Wang, J., Xu, X., Qin, L., Wu, C., & Du, M. (2019). Ultrasound treatment improved the physicochemical characteristics of cod

protein and enhanced the stability of oil-in-water emulsion. *Food Research International*, 121, 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.03.024>

Majzoobi, M., Seifzadeh, N., Farahnaky, A., & Mesbahi, G. (2015). Effects of Sonication on Physical Properties of Native and Cross-Linked Wheat Starches. *Journal of Texture Studies*, 46(2), 105–112.

Martinez-Gonzalez, A. I., Díaz-Sánchez, G., de la Rosa, L. A., Bustos-Jaimes, I., & Alvarez-Parrilla, E. (2019). Inhibition of α -amylase by flavonoids: Structure activity relationship (SAR). *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 206, 437–447. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.08.057>

Mason, T. J. (1990). *Chemistry with ultrasound*.

Mason, T., Paniwnyk, L., & Lorimer, J. (1996). Los usos de los ultrasonidos en la tecnología de los alimentos. *Sonoquímica Ultrasonica*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135041779600034X>

Masudo, T., & Okada, T. (2002). Radiación ultrasónica : principio novedoso para la separación de micropartículas. *Del Congreso Internacional IUPAC Sobre Analítica ...*, 17. https://www.jstage.jst.go.jp/article/analscisp/17icas/0/17icas_0_i1341/_article/-char/ja/

Meng, Y., Liang, Z., Zhang, C., Hao, S., Han, H., Du, P., Li, A., Shao, H., Li, C., & Liu, L. (2021). Ultrasonic modification of whey protein isolate: Implications for the structural and functional properties. *LWT*, 152, 112272. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112272>

Meroni, D., Djellabi, R., Ashokkumar, M., Bianchi, C. L., & Boffito, D. C. (2022). Sonoprocessing: From Concepts to Large-Scale Reactors. In *Chemical Reviews* (Vol. 122, Issue 3, pp. 3219–3258). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00438>

Merouani, S., Hamdaoui, O., Rezgui, Y., & Guemini, M. (2015). Sensitivity of free radicals production in acoustically driven bubble to the ultrasonic frequency and nature of dissolved gases. *Ultrasonics Sonochemistry*, 22, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.07.011>

- Moulton, K. J., & Wang, L. C. (1982). A Pilot-Plant Study of Continuous Ultrasonic Extraction of Soybean Protein. *Journal of Food Science*, 47(4), 1127–1129. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.1982.TB07632.X>
- Nancy, T. G., Víctor, G. O., & Magda, A. M. (2019). *Elaboración de una bebida de flor de Jamaica con pretratamiento de sonicación (Hibiscus sabdariffa) endulzada con Estevia (Stevia rebaudiana B.) y enriquecida con Aloe Vera*. 2(1).
- Noci, F., Walkling-Ribeiro, M., Cronin, D. A., Morgan, D. J., & Lyng, J. G. (2009). Effect of thermosonication, pulsed electric field and their combination on inactivation of *Listeria innocua* in milk. *International Dairy Journal*, 19(1), 30–35.
- O'Sullivan, J., Murray, B., Flynn, C., & Norton, I. (2016). The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins. *Food Hydrocolloids*, 53, 141–154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.02.009>
- Oliveira, G. A. R., Guimarães, J. T., Ramos, G. L. P. A., Esmerino, E. A., Pimentel, T. C., Neto, R. P. C., Tavares, M. I. B., Sobral, L. A., Souto, F., & Freitas, M. Q. (2022). Benefits of thermosonication in orange juice whey drink processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 75, 102876.
- Ordóñez-Santos, L., Martínez-Girón, J., & Arias-Jaramillo, M. E. (2017). Effect of ultrasound treatment on visual color, vitamin C, total phenols, and carotenoids content in Cape gooseberry juice. *Food Chemistry*, 233, 96–100. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814617306957>
- Porras, O. O., González, G., Castellanos, A., Ballesteros, J., & Pacheco, M. (2011). Efecto de la aplicación de ondas de ultrasonido sobre las propiedades fisicoquímicas, reológicas y microbiológicas de pulpa de mango (*mangifera indica* L.) Variedad. *Alimentoshoy.Acta.Org.Co*, 20(23). <https://alimentoshoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/view/26>

- Postema, M., Van Wamel, A., Lancée, C. T., & De Jong, N. (2004). Fenómenos de microburbujas encapsuladas inducidas por ultrasonido. *Ultrasonido En Medicina Y...*, 30(6), 827–840. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2004.02.010>
- Povey, M. J. W., & Mason, T. J. (1998). *Ultrasound in food processing*. Springer Science & Business Media.
- Ragab, E. S., Lu, J., Pang, X. Y., Nassar, K. S., Yang, B. Y., Zhang, S. W., & Lv, J. P. (2019). Effect of thermosonication process on physicochemical properties and microbial load of goat's milk. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 5309–5316.
- Reyes-Cruz, J., Ruiz-Chavarría, G., Lambert-Sánchez, R., Turro-Breff, A., Torres-Tamayo, E., & Hernández-Zapata, S. (2016). Dinámica de las burbujas de cavitación en fluidos amoniacales trasegados con bombas centrífugas. *Minería y Geología*, 32(3), 128–146.
- Romero Barragán, P., & Gelvez Ordoñez, V. M. (2013). Efecto de los campos magnéticos y el ultrasonido sobre la calidad microbiológica y las propiedades funcionales en una emulsión de carne de bufalo (Bubalus. Search.Ebscohost.Com. <https://n9.cl/to48z>
- Shokri, S., Javanmardi, F., Mohammadi, M., & Mousavi Khaneghah, A. (2022). Effects of ultrasound on the techno-functional properties of milk proteins: A systematic review. In *Ultrasonics Sonochemistry* (Vol. 83). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105938>
- Stanic-Vucinic, D., Prodic, I., Apostolovic, D., Nikolic, M., & Cirkovic Velickovic, T. (2013). Structure and antioxidant activity of β -lactoglobulin-glycoconjugates obtained by high-intensity-ultrasound-induced Maillard reaction in aqueous model systems under neutral conditions. *Food Chemistry*, 138(1), 590–599. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2012.10.087>
- Suppavorasatit, I., De Mejia, E. G., & Cadwallader, K. R. (2011). Optimization of the enzymatic deamidation of soy protein by protein-glutaminase and its effect on the functional properties of the protein. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(21), 11621–11628. <https://doi.org/10.1021/jf2028973>

- Tong, X., Cao, J., Tian, T., Lyu, B., Miao, L., Lian, Z., Cui, W., Liu, S., Wang, H., & Jiang, L. (2022). Changes in structure, rheological property and antioxidant activity of soy protein isolate fibrils by ultrasound pretreatment and EGCG. *Food Hydrocolloids*, 122, 107084. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107084>
- Torres, R., Romero, P., & Gelvez, V. M. (2019). Calidad de Emulsiones de Carne de Búfalo (*bubalus bubalis*) tratadas con Ultrasonido de Alta Intensidad. *Información Tecnológica*, 30(3), 157–166.
- Ulloa, J. A., Rosas Ulloa, P., Carmen, J., Ramírez, R., Estela, B., & Rangel, U. (2013). Ultrasonido: aplicaciones en el campo de los alimentos. *Researchgate.Net*, 4(14). https://www.researchgate.net/profile/Jose-Ulloa-2/publication/269095897_Ultrasonido_aplicaciones_en_el_campo_de_los_alimentos/links/547f5c750cf250f1edbd4c4ac/Ultrasonido-aplicaciones-en-el-campo-de-los-alimentos.pdf
- Urteaga, R. (2008). *Concentración de energía en sonoluminiscencia*. PhD Thesis, Inst. Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo. Argentina.
- Valdez-Hurtado, S., López-Bermúdez, L. S., Higuera-Barraza, O. A., Del Toro-Sanchez, C. L., Ruiz-Cruz, S., Suárez-Jiménez, M. G., & Marquez-Rios, E. (2019). Effect of ultrasonication time on the functional properties of giant squid (*Dosidicus gigas*) mantle protein concentrate. *Food Bioscience*, 27, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.11.003>
- Vargas, A., Amescua-Guerra, L. M., Bernal, M. A., & Pineda, C. (2008). Principios físicos básicos del ultrasonido, sonoanatomía del sistema musculoesquelético y artefactos ecográficos. *Acta Ortopédica Mexicana*, 22(6), 361–373.
- Varnam, A., Sutherland, J., & Sutherland, J. (1995). *Carne y productos cárnicos: tecnología, química y microbiología*. <https://n9.cl/lz52if>
- Vercet, A., Burgos, J., Crelier, S., & Lopez-Buesa, P. (2001). Inactivación de proteasas y lipasas por ultrasonidos. *Ciencia Innovadora de Los Alimentos Y...* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1466856400000370>

- Villamiel, M., & de Jong, P. (2000). Inactivation of *Pseudomonas fluorescens* and *Streptococcus thermophilus* in Trypticase® Soy Broth and total bacteria in milk by continuous-flow ultrasonic treatment and conventional heating. *Journal of Food Engineering*, 45(3), 171–179.
- Wang, F., Zhang, Y., Xu, L., & Ma, H. (2020). An efficient ultrasound-assisted extraction method of pea protein and its effect on protein functional properties and biological activities. *Lwt*, 127, 109348. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109348>
- Wang, K., Sun, D.-W., Pu, H., & Wei, Q. (2017). Principles and applications of spectroscopic techniques for evaluating food protein conformational changes: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 207–219. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.015>
- Wang, Y., Wang, Z., Handa, C. L., & Xu, J. (2017). Effects of ultrasound pre-treatment on the structure of β -conglycinin and glycinin and the antioxidant activity of their hydrolysates. *Food Chemistry*, 218, 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.069>
- Wibetoe, G., Takuwa, D. T., Lund, W., & Sawula, G. (1999). Coulter particle analysis used for studying the effect of sample treatment in slurry sampling electrothermal atomic absorption spectrometry. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 363(1), 46–54. <https://doi.org/10.1007/S002160051136>
- Wu, P., Bai, L., & Lin, W. (2020). On the definition of cavitation intensity. *Ultrasonics Sonochemistry*, 67, 105141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105141>
- 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.02.007>
- Zhang, K., Wen, Q., Li, T., Wang, Y., Zhang, Y., & Luo, D. (2022). Comparative study of the effects of ultrasonic power on the structure and functional

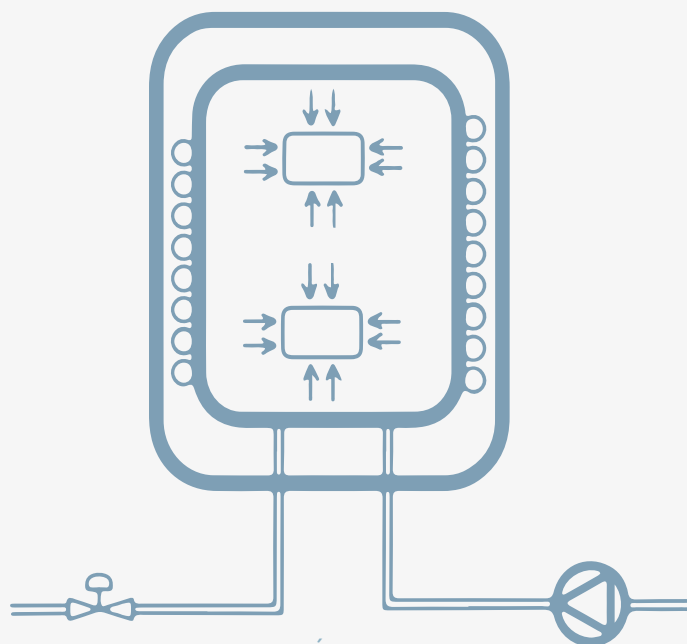
properties of gliadin in wheat and green wheat. *Journal of Food Science*, 87(3), 1020–1034. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16050>

Zhang, L., Zhou, C., Wang, B., Yagoub, A. E. G. A., Ma, H., Zhang, X., & Wu, M. (2017). Study of ultrasonic cavitation during extraction of the peanut oil at varying frequencies. *Ultrasonics Sonochemistry*, 37, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.12.034>

Zhang, Q.-T., Tu, Z.-C., Xiao, H., Wang, H., Huang, X.-Q., Liu, G.-X., Liu, C.-M., Shi, Y., Fan, L.-L., & Lin, D.-R. (2014). Influence of ultrasonic treatment on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolate. *Food and Bioproducts Processing*, 92(1), 30–37. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.07.006>

Zhao, Q., Xie, T., Hong, X., Zhou, Y., Fan, L., Liu, Y., & Li, J. (2022). Modification of functional properties of perilla protein isolate by high-intensity ultrasonic treatment and the stability of o/w emulsion. *Food Chemistry*, 368, 130848. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.130848>

Zou, H., Zhao, N., Sun, S., Dong, X., & Yu, C. (2020). High-intensity ultrasonication treatment improved physicochemical and functional properties of mussel sarcoplasmic proteins and enhanced the stability of oil-in-water emulsion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 589, 124463. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124463>



CAPÍTULO III

Altas presiones isostáticas

Principios y aplicaciones



CAPÍTULO III

ALTAS PRESIONES ISOSTÁTICAS

Objetivo

El objetivo de esta unidad es presentar los conceptos, efectos y aplicación de las altas presiones en las matrices alimentarias.

Definición y fundamentos

Dimensión y nomenclatura

En el Sistema Internacional de medidas (SI) la unidad de medida de la presión es el Pascal (Pa), pero debido a que en el procesamiento de alimentos los niveles de presión requeridos son altos, el prefijo estándar mega (10^6) se multiplica por el Pascal originando así la unidad Mega-Pascal (MPa).

Definición y clasificación

El procesamiento de alimentos con alta presión es un método de conservación no térmico ($5^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$) que garantiza inocuidad y prolonga una mayor vida útil de los alimentos y bebidas, manteniendo o con un impacto mínimo en los atributos organolépticos y nutricionales (Chou et al., 2021, HIPERBARIC, 2021).

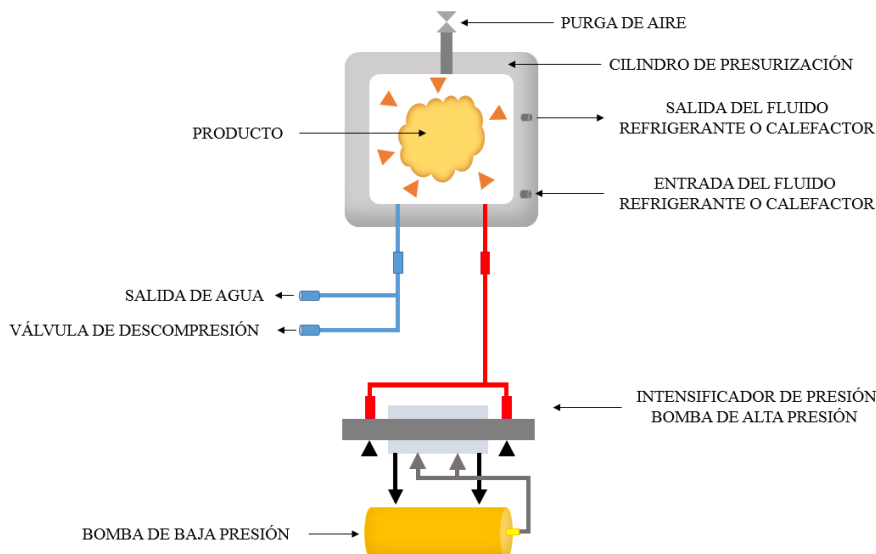
No existe un sistema de clasificación de la alta presión isostática, generalmente se indica es el mecanismo de la generación de la alta presión el cual podría ser por método directo o indirecto. Dichos métodos se indicarán más adelante.

Generación de alta presión

Para la generación y mantenimiento de la presión es necesario la utilización de equipos especiales; un sistema típico de generación de API

consiste de una cámara de alta presión, que en la mayoría de los casos es un cilindro de acero de gran espesor y resistencia. La presión sobre el alimento se genera de forma indirecta por una bomba hidráulica que comprime el medio de presurización en la cámara, previamente cerrada y desaireada, hasta que se alcanza la presión deseada (Mertens, 1995) (Figura 6).

Figura 7
Esquema de una maquina de API.



Fuente: Tomada de Gervilla (2002)

Existen dos formas de generación de la alta presión isostática, a saber:

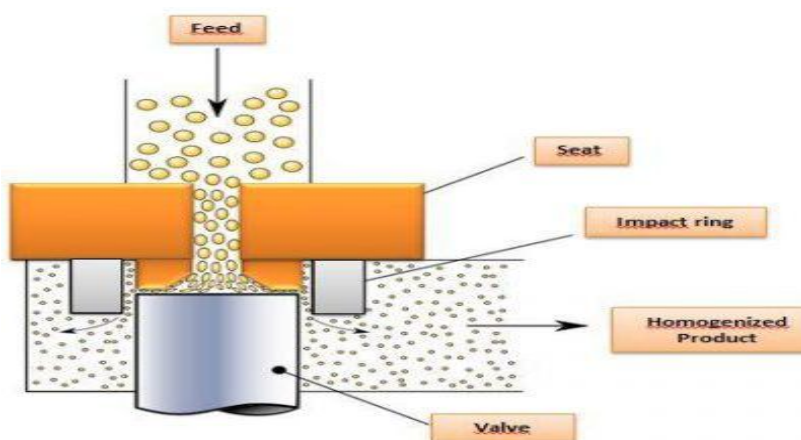
- **Método de producción de alta presión por compresión directa.**
En la cual el alimento se comprime debido a la presión transmitida por el fluido que lo rodea y que a su vez es suministrada por un pistón desde la bomba que la produce.
- **Método de producción de alta presión por compresión indirecta.**
El alimento se comprime por la presión transmitida por el medio, este a su vez recibe la compresión de una bomba generadora que la intensifica (Santamaria, 2010).

En actualidad ya existen equipos de procesamiento industrial, los cuales permiten la existencia de procesos semicontinuos y son utilizados principalmente para el tratamiento de alimentos líquidos.

Los métodos de procesamiento continuo de alta presión se denomina homogeneización a alta presión (HPH) o tecnología de ultra cizallamiento (UST) (Janahar et al., 2022) los cuales aún no son expedidos en el comercio (Ravichandran et al., 2023).

En la aplicación de homogenización por alta presión, el producto (líquido) se somete a una presión hasta 400 MPa y se somete a un esfuerzo de cizallamientos por el paso a través de una válvula cuyo espacio de paso puede controlarse (ampliarse o reducirse). El impacto del alimento líquido contra este diminuto espacio de paso produce una ultrarrápida depresión, lo que puede traer como consecuencia la combinación de fuerzas de cizalla, cavitación, turbulencia, coalescencia aumento de la temperatura (2-2,5°C por cada 10MPa). En el proceso de aplicación de la presión es posible controlar, además de la presión, la temperatura de proceso (máxima o mínima) (Floury et al., 2004; Guamis et al., 2006; Maresca et al., 2011; Ruiz-Espinosa et al., 2013). En la siguiente Figura se puede apreciar el esquema del proceso.

Figura 8
Esquema del proceso de homogeneización a alta presión.



Fuente: Aushulz. Tomado y modificado de Wikipedia (Licencia de Documentación GNU)

Efectos de la aplicación de alta presión

El concepto más básico para interpretar el efecto de la presión en las reacciones químicas es el principio de Le Chatelier, donde la presión favorece los procesos químicos que dan lugar a la reducción del volumen y disminuye aquéllos que favorecen el aumento del mismo. Por tanto, se puede calcular aproximadamente cómo la presión podría afectar algunos procesos si se conoce la carga neta de volumen que los acompaña. Por ejemplo, la presión tiende a disociar las interacciones electrostáticas porque la ionización de sistemas acuosos va acompañada de una disminución del volumen. La presión, además, tiende a romper las interacciones hidrofóbicas porque la ruptura de estas interacciones causa la contracción del volumen. Por el contrario, el rompimiento de los puentes de hidrógeno y los enlaces covalentes está limitado por la presión porque podrían favorecer el aumento del volumen. Las reacciones químicas que conllevan un cambio de volumen se relacionan en la tabla siguiente (Lee, 2002).

Tabla 6
Efectos de la aplicación de altas presiones isostáticas.

Tipo de efecto	Efecto de la presión	Tipo de enlace	Ejemplo	ΔV (mL/mol)	Autor
Químico	Rompe las interacciones electrostáticas.	Iónico	$H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$	-21	Messens et al., (1997)
	Rompe las interacciones hidrofóbicas.	Hidrofóbico	CH ₄ en hexano CH ₄ en agua	-23	Floury et al., (2000)
	Protege.	Covalente	C-C	+12	Hata et al., (2020)
	Aumenta enlaces.	Enlaces Hidrógeno	$-OH...O= \rightarrow -OH + O=$	+4	Bai et al., (2021)
	Desnaturalización.	Proteína	Mioglobina (pH 5,0) (nativa $\rightarrow$ desnaturalizada)	-98	Cheah & Ledward, (1996)
	Disociación.	Proteína	Lactatodeshidrogenasa (M ₄ $\rightarrow$ 4M)	-500	Lüdemann, (1988)
Físico	Aumento de la temperatura.	calentamiento por compresión adiabática	Depende de las propiedades termodinámicas de la muestra		Balasubramaniam et al., (2004)
	Disminución o aumento de volumen.	Según la presión aplicada	Depende de la muestra.		

Fuente: Elaboración propia (2022)

Balny y Masson (2009) indicaron que con el aumento de la presión se aumenta el grado de ordenación de las moléculas de una sustancia, esto cuando se realiza a temperatura constante. De esta manera formularon el principio de ordenación microscópica que establece que la temperatura y la presión ejercen fuerzas antagónicas sobre las reacciones y químicas y la estructura molecular.

También es necesario, en el estudio de este proceso, considerar el llamado principio isostático que indica que en toda la muestra la presión se distribuye uniformemente. Por lo cual, el tiempo de tratamiento es independiente del tamaño y la forma de dicha la muestra, y supone distribución térmica uniforme en de la muestra.

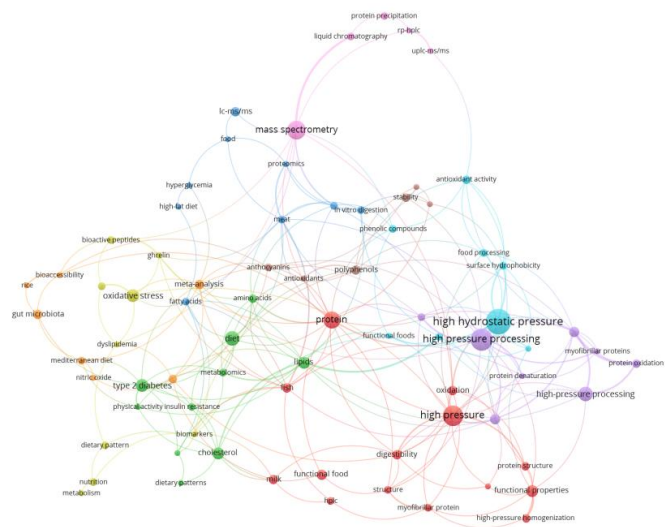
La temperatura dentro de la cámara de presión no se mantiene constante durante el incremento de la presión, sino que aumenta ligeramente. Para predecir el calentamiento adiabático puede usarse la ecuación de Pfister et al. (2001), donde β es la compresibilidad de la sustancia, ρ es la densidad y C_p el calor específico de la muestra.

$$[\Delta T / \Delta P]_{\text{adiabático}} = \beta \cdot T / \rho \cdot C_p. \quad (\text{Ecuación 1})$$

Estado del arte

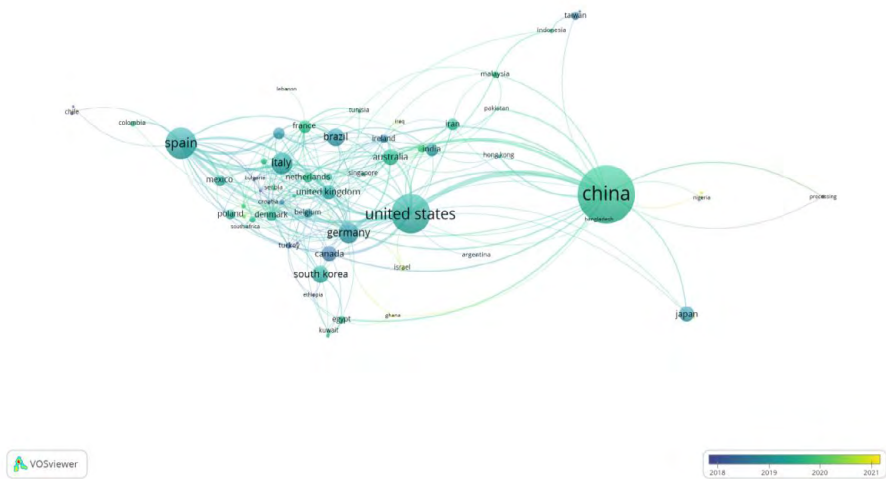
El interés en el uso de altas presiones para procesar alimentos ha crecido considerablemente en los últimos años, como lo demuestran las Figuras 9 y 10. Este texto se centra en los estudios que han investigado los efectos de aplicar una presión uniforme a los alimentos a nivel molecular. Estos estudios son cruciales para comprender cómo las altas presiones pueden alterar la composición y las propiedades de los alimentos, lo que a su vez permite desarrollar nuevos procesos de conservación y mejorar la calidad de los productos. A nivel global, China ha sido líder en esta área de investigación, seguida por países como Estados Unidos, España, Alemania e Italia.

Figura 9
Estado del arte sobre producción científica de investigaciones con altas presiones por palabras clave.



Fuente: Elaboración propia (2022)

Figura 10
Estado del arte sobre producción científica de investigaciones con altas presiones por país.



Fuente: Elaboración propia (2022)

Efectos en las matrices alimentarias

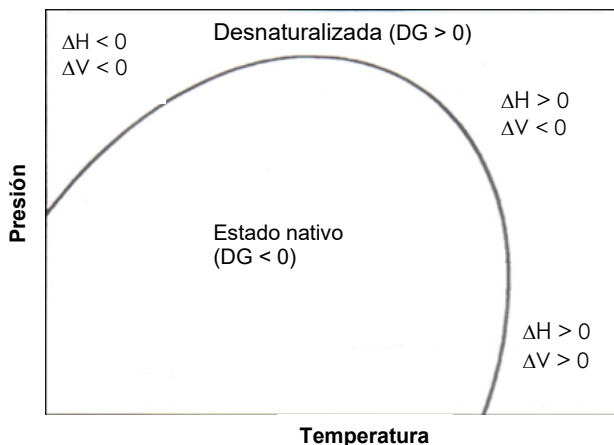
La escasa estabilidad de la estructura nativa de la proteína se afecta por las condiciones ambientales tales como composición del solvente, temperatura y presión. El término “desnaturalización de las proteínas” indica el fenómeno por el cual la estructura superior se disocia por cambios en el ambiente, y la estructura primaria se mantiene sin daño alguno (Furukawa & Hayakawa, 1992). Las interacciones químicas que estabilizan la conformación nativa de las proteínas incluyen los puentes disulfuro y las interacciones débiles no covalentes tales como puentes de hidrógeno, interacciones hidrofóbicas, interacciones iónicas y enlaces de van der Waals. El limitado margen de estabilidad de las proteínas puede apreciarse si se compara el ΔG de desnaturalización (-20 a -65 kJ / mol) con el ΔG de la conformación de enlaces covalentes (-200 a -400 kJ / mol) (Nelson & Cox, 2008).

La desnaturalización de las proteínas por API ya fue observada por Bridgman en 1914. Sin embargo, los estudios acerca de la desnaturalización proteica por presión no se realizaron hasta 50 años más tarde, con ovoalbúmina (Suzuki et al., 1963), ribonucleasa A (Brandts et al., 1970), quimiotripsina (Hawley, 1971) o metamioglobina (Zipp & Kauzmann, 1973). La evaluación cuantitativa de la desnaturalización inducida por presión propone diagramas P/T que revelan un contorno elíptico indicando que las proteínas pueden ser desnaturalizadas tanto a altas como a bajas temperaturas (Figura 9).

En la desnaturalización inducida por presión no se observan cambios en los enlaces covalentes (Furukawa & Hayakawa, 1992). Las proteínas desnaturalizadas por presión son relativamente más compactas y retienen elementos de la estructura secundaria, mientras que las desnaturalizadas por calor tienen configuraciones extendidas y están unidas al azar (Ghosh et al., 2001).

Figura 11

Diagrama que ilustra el efecto de la temperatura y presión en la desnaturalización de las proteínas.



Fuente: Tomado de Ponce (2000)

Como se ha mencionado anteriormente, la presión promueve las reacciones químicas que reducen el volumen, por tanto, el blanco principal de la presión son las interacciones electrostáticas e hidrofóbicas que mantienen la estructura de las proteínas y que, además de sus transiciones estructurales por rompimiento, se acompañan por grandes cambios en la hidratación, los cuales conducen a la reducción del volumen. La ionización inducida por presión incrementa la exposición del solvente en las cadenas de aminoácidos y los enlaces peptídicos o la difusión del agua en las cavidades localizadas en el núcleo hidrofóbico, las cuales podrían ser las principales fuentes de la disminución de volumen (Furukawa & Hayakawa, 1992). El resultado neto del decrecimiento del volumen acompañado por la desnaturalización de la proteína oscila entre -30 a -300 mL / mol (Heremans, 2003; Weber & Drickamer, 1983).

Debido a que las interacciones hidrofóbicas juegan un papel importante en la estabilización de la estructura cuaternaria, las proteínas pueden ser disociadas por la presión. Las proteínas oligoméricas tienden a disociarse en subunidades a baja presión (150 - 200 MPa) y luego a reasociarse a presión alta (Ohmiya et al., 1989). Los agregados de

elevado peso molecular se forman después del desdoblamiento de las proteínas inducido por la presión y estabilizados por puentes disulfuro intermoleculares. Estos puentes disulfuro se forman por reacciones de intercambio entre los grupos -SH / S-S o por oxidación de los grupos sulfhidrilos (Funtenberger et al., 1995; Messens et al., 1997; Van Camp & Huyghebaert, 1995).

Frecuentemente las investigaciones intentan explicar la estabilidad de una proteína frente a la presión en términos de compresibilidad adiabática, porque engloba la hidratación y efectos de cavidad, además de los cambios de volumen molar parcial. Aunque estos parámetros pueden dar una percepción de los cambios de las propiedades de las proteínas aún se desconoce si las proteínas altamente compresibles son más lábiles que las de baja compresibilidad (Gekko & Hasegawa, 1986; Gekko & Yamagami, 1991).

Gelvez (2005) elaboró una crema de yema de huevo (27,5; 30 y 32,5%) con altas presiones isostáticas (0, 300, 400, 500 y 600 MPa/ 2, 20, 40 °C/2, 10 y 20 min) evaluando su reología, Parámetros físico químicos, digestibilidad y composición. Determinaron, por superficie de respuesta, la formula y combinación de tratamiento (30% de yema, 600 MPa, 20°C) con la cual se alcanza un producto características reológicas similares al producto comercial. Encontraron que con el aumento de la presión el índice de fluidez (η) aumenta. El producto desarrollado tiene menos calorías, mejor digestibilidad y el color cambia con los tratamientos y concentración de componentes.

Szerman et al. (2019) estudiaron el efecto combinado simultáneamente la concentración de sal (NaCl, 0–2 %), la concentración de tripolifosfato de sodio (STPP, 0–0,5 %), el nivel de presión aplicada (100–300 MPa) y el tiempo de retención del tratamiento (1–5 min) sobre parámetros tecnológicos, propiedades fisicoquímicas y texturales de hamburguesas de res. Encontraron que el pH aumenta con la presión y la cantidad de polifosfato debido a que las altas presiones desnaturalizan las proteínas, por lo tanto, aumentan la ionización y se produce redistribución de iones con la consecuente pérdida de protones libres y la disminución de grupos ácidos disponibles (Macfarlane et al., 1981; Mandava et al., 1994).

El tratamiento con alta presión (100 y 300 MPa) aumentó las pérdidas por cocción como producto de la desnaturalización de proteínas con la cual se limita su extracción y funcionalidad (Mandava et al., 1994; Speroni et al., 2014). En lo relacionado con el color en hamburguesas crudas, encontraron que la luminosidad (L^*) aumentó a medida que aumentó la presión de tratamiento, este aumento es debido a desnaturalización de la proteína (globina), al desplazamiento del grupo hemo, a las modificaciones estructurales (fibra muscular y miofibrillas), a los cambios en la refracción del sarcoplasma, y alteraciones en las propiedades de la carne de dispersión de la luz (Carlez et al., 1995; Hughes et al., 2014). Así mismo, determinaron que en la textura la presión ejerce un efecto lineal positivo significativo ($p < 0,05$) sobre los parámetros de dureza y masticabilidad; los cuales aumentan con el aumento de la presión, este comportamiento es debido a que por la aplicación de tratamientos de alta presión la unión entre partículas se ve mejorada por la formación de agregados estabilizados por enlaces disulfuro e hidrofóbicos durante la modificación de las proteínas miofibrilares (Colmenero et al., 1997).

Al-Ghamdi et al. (2020) estudiaron el efecto de esterilización térmica asistida por alta presión (600 MPa y 90 °C temperatura de durante 5 min) sobre la validación microbiana (*Bacillus amyloliquefaciens*, cepas Fad 82 y 11/2), recuentos de bacterias aeróbicas y anaeróbicas; cantidad de vitamina C y pigmentos, cambios en el color y el pH de purés de frutas y vegetales (calabazas frescas, calabacines, remolachas, papas moradas y guisantes) fortificados con vitamina C.

Encontraron que el tratamiento inactivó completamente la carga microbiana de *B. amyloliquefaciens* Fad 82 y 11/2 inoculadas. En cuanto a al contenido de vitamina C reportaron que este se redujo en 14%, 10%, 3%, 10% y 4% en la calabaza, nuez moscada, guisantes, remolacha y patata morada respectivamente; estas pérdidas fueron atribuidas a la combinación de calor y alta presión, ya que según Raj et al. (2019) la pérdida de vitamina C es menor, aproximadamente >10 % cuando no se utiliza calor y el tratamiento por alta presión no afecta el contenido de vitamina C tanto como la alta temperatura.

En cuanto al efecto del tratamiento combinado alta presión-alta temperatura sobre los pigmentos reportaron que hubo disminución no significativa ($p < 0,05$) de la clorofila total y la clorofila b; mientras que la disminución de las betalainas, betacianina y las betaxantinas en la remolacha roja sí fue significativa ($p > 0,05$) al igual que la antocianina en papas moradas. Dicha disminución es atribuida principalmente a los efectos del calor ya que la mayoría de estos compuestos no se ven afectados por la presión (Butz et al., 2002; Jimenez et al., 2010; Jiménez-Aguilar et al., 2015; Liu et al., 2016). Mientras que para el β -caroteno en calabaza y nuez moscada el tratamiento no tuvo efecto significativo ($p < 0,05$) debido a que este compuesto no es sensible al calor ni a la presión como fue indicado por Sonar et al. (2019) y Zhang et al. (2019). Por su parte, el pH disminuyó para todos los productos tratados, exceptuando la papa morada para la cual no tuvo cambios; esta reducción podría deberse a que los enlaces de hidrógeno se rompen, y a que se forman fracciones hidrofóbicas. Además, se presentaron cambios en la acidez de los alimentos tratados como producto de ruptura de la fibra dejando expuestos ácidos y sitios de unión (Torres et al., 2016). En el color el tratamiento produjo que la luminosidad (L^*) disminuyera en la nuez moscada y los guisantes, y aumentara en la calabaza, remolacha y papas moradas. El parámetro b^* disminuyó en la remolacha y la nuez moscada, mientras que en los otros productos aumentó o permaneció igual; lo cual es debido a que en altas temperaturas el β -caroteno (en especial en la calabaza) puede ser extraído (García-Parra et al., 2016). El parámetro a^* disminuyó significativamente para los guisantes y la papa morada posiblemente como producto de la reducción de la cantidad de antocianinas; en los demás productos quedó igual o aumento.

Bai et al. (2021) investigaron el efecto de la alta presión hidrostática (HHP/ 0,1, 100, 150 y 200 MPa) sobre el tamaño de partícula, microestructura, tensión interfacial, propiedades emulsionantes y estructura secundaria de la miosina. Demostraron que a medida que la presión aumenta de 0,1 a 150 MPa, se reduce el tamaño de las gotas de aceite y el contenido de hélice α de la proteína, mejora la viscoelasticidad de la película proteica interfacial, y aumentan la actividad emulsionante y la estabilidad de la miosina. A presiones mayores (hasta 200 MPa)

se presenta influencia negativa en la estabilidad y actividad de las emulsiones. A medida que la presión aumenta la emulsión disminuye la elasticidad interfacial y aumenta el contenido de espiral de proteína (aleatoria) y el tamaño de partícula aumentó. Concluyeron que el tratamiento con HHP a 150 MPa mejora la estabilidad de las emulsiones estudiadas.

Janahar et al. (2022) estudiaron efecto del tratamiento con altas presiones isostáticas (400 MPa/ 25°C) sobre mezclas de proteína de leche y proteína de guisantes (1:0,5, 1:1 y 1:3). Evaluaron el efecto del tratamiento en el tamaño de partículas, solubilidad, pH, potencial Z, reología. Encontraron que el tratamiento con altas presiones no provoca reducción significativa en el tamaño de las partículas (diámetro y la altura media) para todas las proporciones de proteínas estudiadas (Stratakos et al., 2019; Z. Zhang et al., 2020). La solubilidad no fue afectada por el tratamiento al igual que el pH. Mientras que el potencial Z aumentó significativamente siendo mayor en las muestras con mayor concentración de proteína. El estudio reológico de las muestras tratadas demostró un comportamiento dilatante o espesante por cizallamiento. Este comportamiento se caracteriza por un aumento de la viscosidad al incrementar la velocidad de deformación, lo cual se atribuye a la formación de agregados de partículas debido al aumento de las colisiones interparticulares y a la mayor energía cinética del sistema (McClements, 2004). Al igual que lo demostrado por Janahar et al., (2021) el índice de sedimentación varió entre 18,33 a 75,00 % como producto de la alteración de la conformación de macromoléculas de grasa y proteína e induciendo a la formación de agregados.

Janahar et al. (2022) evaluaron la producción de dispersiones coloidales de proteína láctea y vegetal (guisantes), en diferentes concentraciones (1:0,5, 1:1 y 1:3), utilizando homogenización a altas presiones (UST, 400MPa/40 y 70°C). Encontraron que el tratamiento de homogenización a altas presiones causa reducción significativa del tamaño (diámetro y altura) solo en las soluciones de menor concentración de proteína y menor temperatura; mientras que en las muestras con mayor concentración de proteína y tratadas a mayor temperatura (70°C) causa aumento de tamaño de la partícula como consecuencia de la desintegración provocada en las

partículas más grandes, el aumento tanto del área interfacial como las interacciones entre moléculas.

Otros factores que promueven el aumento de tamaño podrían ser las asociaciones proteína-proteína y el aumento de la hidrofobicidad por los cambios en la superficie de las proteínas como consecuencia de la desnaturalización provocada por el cizallamiento y la combinación presión-cizallamiento-temperatura (Janahar et al., 202; McClements et al., 2019; Sliwinski et al., 2003).

En la solubilidad el tratamiento produjo un aumento significativo, especial a altas temperaturas, lo cual fue atribuido a que el cizallamiento reduce el tamaño de las partículas grandes de proteína y provoca reordenamiento de sus agregados favoreciendo la interacción proteína-disolvente y la accesibilidad a reacciones (Chen et al., 2016; Moll et al., 2021). En el pH no se presentaron cambios significativos por efecto del tratamiento. Mientras que el potencial Z fue inverso a la cantidad de proteína, es decir disminuyó significativamente ($P < 0,05$) con el aumento de esta, lo cual se debió a que el tratamiento provoca que los aminoácidos cargados se trasladen de la superficie proteica al interior y pueden crear enlaces proteína-proteína, enmascarando las cargas negativas; así mismo, el cizallamiento provocado por la presión modifica la superficie de la proteína provocando este comportamiento (Janahar et al., 2021; Relkin & Shukat, 2012).

Por su parte, en el estudio reológico se pudo observar que a mayor concentración de proteína y mayor temperatura se presenta formación de geles más firmes o con mayor fuerza, carácter más elástico (mayor módulo de almacenamiento G' y tangente del ángulo de fase <1) y pseudoplásticidad ($n < 1$) lo cual fue debido a que el tratamiento induce la formación de redes macromoleculares y estructuras complejas, e influyen el tamaño de las partículas (Janahar et al., 2022). De otro lado, el cizallamiento y la temperatura ocasionados por la presión en el tratamiento promueven las interacciones moleculares de proteínas y grasas (atracciones de Van der Waals, la interacción dipolo-dipolo, las interacciones hidrofóbicas y los enlaces de hidrógeno) creando una red de gel que aumenta la viscosidad.

Janardhanan et al. (2023) investigaron los efectos del tratamiento con alta presión isostática (HPP, 350–600 MPa) durante 5–15 min sobre el análisis proximal (Humedad, proteína, grasa y cenizas totales), las características fisicoquímicas (pH, textura y color) y pérdidas de cocción de hamburguesas de carne de ternera, de harina de vegetales (soja, arroz y alubia) y mixta (50% carne y 50% de harina de vegetales). Encontraron que en el color de las hamburguesas de harina de vegetales y hamburguesas mixtas el valor de a^* y h (ángulo de matiz) aumentan con el aumento de la presión. Mientras que en las hamburguesas de carne solo se observó aumento significativo en el valor de b^* atribuido a la oxidación de la mioglobina ferrosa (Janardhanan et al., 2022). El pH de las hamburguesas de harina de vegetales fue menos ácido debido a que los grupos ácidos disponibles disminuyeron por las variaciones en la conformación de las proteicas durante la aplicación de alta presión (McArdle et al., 2010).

En la textura el tratamiento no tuvo efectos sobre las hamburguesas de harina; pero produjo aumento en los parámetros de dureza y masticabilidad de los productos elaborados con carne. La dureza, la gomosidad y la masticabilidad de las hamburguesas mixtas fueron mayores y aumentaron a mayor presión y mayor tiempo de tratamiento. Los anteriores resultados pueden ser atribuidos a que según Janardhanan et al. (2023), McArdle et al. (2010), Szerman et al. (2019) y Zhou et al. (2022) la dureza aumenta cuando los enlaces cruzados se vuelven más fuertes; la interacción entre las proteínas miofibrilares y vegetales por efecto de la alta presión y redistribución de iones por los cambios conformacionales de las proteínas.

Szerman et al. (2019) estudiaron el efecto combinado simultáneamente la concentración de sal (NaCl, 0–2 %), la concentración de tripolifosfato de sodio (STPP, 0–0,5 %), el nivel de presión aplicada (100–300 MPa) y el tiempo de retención del tratamiento (1–5 min) sobre parámetros tecnológicos, propiedades fisicoquímicas y texturales de hamburguesas de res. Encontraron que el pH aumenta con la presión y la cantidad de polifosfato debido a que las altas presiones desnaturalizan las proteínas por lo tanto aumentan la ionización y se produce redistribución de iones

con la consecuente pérdida de protones libres y la disminución de grupos ácidos disponibles (Macfarlane et al., 1981; Mandava et al., 1994).

El tratamiento con alta presión (100 y 300 MPa) aumentó las pérdidas por cocción como producto de la desnaturalización de proteínas con la cual se limita su extracción y funcionalidad (Mandava et al., 1994; Speroni et al., 2014). En lo relacionado con el color, encontraron que la luminosidad (L^*) fue mayor a medida que aumentó la presión de tratamiento y es debido a desnaturalización de la proteína (globina), al desplazamiento del grupo hemo, a las modificaciones estructurales (fibra muscular y miofibrillas), a los cambios en la refracción del sarcoplasma, y alteraciones en las propiedades de la carne de dispersión de la luz (Carlez et al., 1995; Hughes et al., 2014).

Bibliografía

- Al-Ghamdi, S., Sonar, C. R., Patel, J., Albahr, Z., & Sablani, S. S. (2020). High pressure-assisted thermal sterilization of low-acid fruit and vegetable purees: Microbial safety, nutrient, quality, and packaging evaluation. *Food Control*, 114, 107233. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107233>
- Bai, Y., Zeng, X., Zhang, C., Zhang, T., Wang, C., Han, M., Zhou, G., & Xu, X. (2021). Effects of high hydrostatic pressure treatment on the emulsifying behavior of myosin and its underlying mechanism. *LWT*, 146, 111397. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111397>
- Balasubramaniam, V. M., Ting, E. Y., Stewart, C. M., & Robbins, J. A. (2004). Recommended laboratory practices for conducting high-pressure microbial inactivation experiments. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5(3), 299–306. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2004.04.001>
- Balny, C., & Masson, P. (2009). Effects of high pressure on proteins. <https://doi.org/10.1080/87559129309540980>, 9(4), 611–628. <https://doi.org/10.1080/87559129309540980>
- Brandts, J. F., Oliveira, R. J., & Westort, C. (1970). Thermodynamics of Protein Denaturation. Effect of Pressure on the Denaturation of Ribonuclease A. *Biochemistry*, 9(4), 1038–1047. https://doi.org/10.1021/B100806A045/ASSET/B100806A045.FP.PNG_V03
- Bridgman, P. W. (2014). The coagulation of albumen by pressure. *Papers 12-31*, 735–736. <https://doi.org/10.4159/HARVARD.9780674287808.C8/HTML>
- Butz, P., Edenharder, R., García, A. F., Fister, H., Merkel, C., & Tauscher, B. (2002). Changes in functional properties of vegetables induced by high pressure treatment. *Food Research International*, 35(2–3), 295–300.
- Carlez, A., Veciana-Nogues, T., & Cheftel, J.-C. (1995). Changes in colour and myoglobin of minced beef meat due to high pressure processing. *LWT-Food Science and Technology*, 28(5), 528–538.

- Cheah, P. B., & Ledward, D. A. (1996). High pressure effects on lipid oxidation in minced pork. *Meat Science*, 43(2), 123–134. [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(96\)84584-0](https://doi.org/10.1016/0309-1740(96)84584-0)
- Chen, X., Xu, X., & Zhou, G. (2016). Potential of high pressure homogenization to solubilize chicken breast myofibrillar proteins in water. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 170–179.
- Chou, C. H., Wang, C. Y., Shyu, Y. T., & Wu, S. J. (2021). The effect of high-pressure processing on reducing the glycaemic index of atemoya puree. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(4), 1546–1553. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10773>
- Colmenero, F. J., Carballo, J., Fernández, P., Barreto, G., & Solas, M. T. (1997). High-pressure-induced changes in the characteristics of low-fat and high-fat sausages. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 75(1), 61–66.
- Floury, J., Desrumaux, A., & Lardières, J. (2000). Effect of high-pressure homogenization on droplet size distributions and rheological properties of model oil-in-water emulsions. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 1(2), 127–134. [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(00\)00012-6](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(00)00012-6)
- Floury, J., Legrand, J., & Desrumaux, A. (2004). Analysis of a new type of high pressure homogeniser. Part B. study of droplet break-up and recoalescence phenomena. *Chemical Engineering Science*, 59(6), 1285–1294. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2003.11.025>
- Funtenerberger, S., Dumay, E., & Cheftel, J. C. (1995). Pressure-induced aggregation of β -lactoglobulin in pH 7.0 buffers. *LWT - Food Science and Technology*, 28(4), 410–418. [https://doi.org/10.1016/0023-6438\(95\)90025-X](https://doi.org/10.1016/0023-6438(95)90025-X)
- Furukawa, S., & Hayakawa, I. (1992). Pressure denaturation of proteins. *High Pressure Biotechnology*, 6(1), 89–99. <https://doi.org/10.4265/BIO.6.33>

- García-Parra, J., González-Cebrino, F., Delgado, J., Cava, R., & Ramírez, R. (2016). High pressure assisted thermal processing of pumpkin purée: Effect on microbial counts, color, bioactive compounds and polyphenoloxidase enzyme. *Food and Bioproducts Processing*, 98, 124–132.
- Gekko, K., & Hasegawa, Y. (1986). Compressibility-Structure Relationship of Globular Proteins. *Biochemistry*, 25(21), 6563–6571. https://doi.org/10.1021/BI00369A034/ASSET/BI00369A034.FP.PNG_V03
- Gekko, K., & Yamagami, K. (1991). Flexibility of Food Proteins as Revealed by Compressibility. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 39(1), 57–62. https://doi.org/10.1021/JF00001A010/ASSET/JF00001A010.FP.PNG_V03
- Gelvez Ordoñez, V. M. (2005). *Elaboracion de crema de huevo mediante alta presion isostatica e irradiación* [Universitat Autònoma de Barcelona]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=231298&info=resumen&idioma=SPA>
- Ghosh, T., García, A. E., & Garde, S. (2001). Molecular Dynamics Simulations of Pressure Effects on Hydrophobic Interactions. *Journal of the American Chemical Society*, 123(44), 10997–11003. <https://doi.org/10.1021/JA010446V>
- Guamis, B., Trujillo, T., Ferragut, V., & Daoudy, L. (2006). Aplicaciones de las altas presiones en la industria alimentaria. In *Técnicas avanzadas de procesamiento y conservación de alimentos* (Vol. 13, pp. 61–76). Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2041025>
- Hata, H., Nishihara, Y., Nishiyama, M., Sowa, Y., Kawagishi, I., & Kitao, A. (2020). High pressure inhibits signaling protein binding to the flagellar motor and bacterial chemotaxis through enhanced hydration. *Scientific Reports 2020 10:1*, 10(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59172-3>
- Hawley, S. A. (1971). Reversible Pressure-Temperature Denaturation of Chymotrypsinogen. *Biochemistry*, 10(13), 2436–2442. https://doi.org/10.1021/BI00789A002/ASSET/BI00789A002.FP.PNG_V03

- Heremans, K. (2003). High Pressure Effects on Proteins and other Biomolecules. *Http://Dx.Doi.Org/10.1146/Annurev.Bb.11.060182.000245*, 11, 1–21. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.BB.11.060182.000245>
- HIPERBARIC. (2021). *What is High Pressure Processing (HPP)?* <https://www.hiperbaric.com/en/high-pressure/>
- Hughes, J. M., Oiseth, S. K., Purslow, P. P., & Warner, R. D. (2014). A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness. *Meat Science*, 98(3), 520–532.
- Janahar, J. J., Balasubramaniam, V. M., Jimenez-Flores, R., Campanella, O. H., García-Cano, I., & Chen, D. (2022). Pressure, shear, thermal, and interaction effects on quality attributes of pea-dairy protein colloidal dispersions. *Food Hydrocolloids*, 131, 107811. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107811>
- Janahar, J. J., Marciniak, A., Balasubramaniam, V. M., Jimenez-Flores, R., & Ting, E. (2021). Effects of pressure, shear, temperature, and their interactions on selected milk quality attributes. *Journal of Dairy Science*, 104(2), 1531–1547.
- Janardhanan, R., Huerta-Leidenz, N., Ibañez, F. C., & Beriain, M. J. (2023). High-pressure processing and sous-vide cooking effects on physicochemical properties of meat-based, plant-based and hybrid patties. *LWT*, 173, 114273. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114273>
- Janardhanan, R., Virseda, P., Huerta-Leidenz, N., & Beriain, M. J. (2022). Effect of high-hydrostatic pressure processing and sous-vide cooking on physicochemical traits of Biceps femoris veal patties. *Meat Science*, 108772.
- Jiménez-Aguilar, D. M., Escobedo-Avellaneda, Z., Martín-Belloso, O., Gutiérrez-Urbe, J., Valdez-Fragoso, A., García-García, R., Torres, J. A., & Welte-Chanes, J. (2015). Effect of high hydrostatic pressure on the content of phytochemical compounds and antioxidant activity of prickly pears (*Opuntia ficus-indica*) beverages. *Food Engineering Reviews*, 7, 198–208.

- Jimenez, N., Bohuon, P., Lima, J., Dornier, M., Vaillant, F., & Pérez, A. M. (2010). Kinetics of anthocyanin degradation and browning in reconstituted blackberry juice treated at high temperatures (100–180 C). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(4), 2314–2322.
- Lee, D.-U. (2002). *Application of combined non-thermal treatments for the processing of liquid whole egg*.
- Liu, S., Xu, Q., Li, X., Wang, Y., Zhu, J., Ning, C., Chang, X., & Meng, X. (2016). Effects of high hydrostatic pressure on physicochemical properties, enzymes activity, and antioxidant capacities of anthocyanins extracts of wild *Lonicera caerulea* berry. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 36, 48–58.
- Lüdemann, H.-D. (1988). Influence of pressure on protein conformation. *Makromolekulare Chemie. Macromolecular Symposia*, 17(1), 29–38. <https://doi.org/10.1002/MASY.19880170105>
- Macfarlane, J. J., McKenzie, I. J., Turner, R. H., & Jones, P. N. (1981). Pressure treatment of meat: Effects on thermal transitions and shear values. *Meat Science*, 5(4), 307–317.
- Mandava, R., Fernandez, I., & Juillerat, M. (1994). Effect of high hydrostatic pressure on sausage batters. *Proceedings of 40th International Congress of Meat Science and Technology*, 1–6.
- Maresca, P., Donsì, F., & Ferrari, G. (2011). Application of a multi-pass high-pressure homogenization treatment for the pasteurization of fruit juices. *Journal of Food Engineering*, 104(3), 364–372. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.030>
- McArdle, R., Marcos, B., Kerry, J. P., & Mullen, A. (2010). Monitoring the effects of high pressure processing and temperature on selected beef quality attributes. *Meat Science*, 86(3), 629–634.
- McClements, D. J. (2004). *Food emulsions: principles, practices, and techniques*. CRC press.
- McClements, D. J., Newman, E., & McClements, I. F. (2019). Plant-based milks: A review of the science underpinning their design, fabrication,

and performance. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(6), 2047–2067.

Mertens, B. (1995). Hydrostatic pressure treatment of food: equipment and processing. In *New Methods of Food Preservation*. Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2105-1_7

Messens, W., Van Camp, J., & Huyghebaert, A. (1997). The use of high pressure to modify the functionality of food proteins. *Trends in Food Science & Technology*, 8(4), 107–112. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(97\)01015-7](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(97)01015-7)

Moll, P., Salminen, H., Schmitt, C., & Weiss, J. (2021). Impact of microfluidization on colloidal properties of insoluble pea protein fractions. *European Food Research and Technology*, 247(3), 545–554.

Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2008). *Lehninger Lehninger Principles of biochemistry. The citric acid cycle*.

Ohmiya, K., Kajino, T., Shimizu, S., & Gekko, K. (1989). Effect of Pressure on the Association States of Enzyme-treated Caseins. *Agricultural and Biological Chemistry*, 53(1), 1–7. <https://doi.org/10.1080/00021369.1989.10869259>

Pfister, M. K.-H. (2001). *Influence of high pressure treatment on chemical alterations in foods a literature review*.

Raj, A. S., Chakraborty, S., & Rao, P. S. (2019). Thermal assisted high-pressure processing of Indian gooseberry (*Embilica officinalis* L.) juice–Impact on colour and nutritional attributes. *Lwt*, 99, 119–127.

Ravichandran, C., Jayachandran, L. E., Kothakota, A., Pandiselvam, R., & Balasubramaniam, V. M. (2023). Influence of high pressure pasteurization on nutritional, functional and rheological characteristics of fruit and vegetable juices and purees-an updated review. In *Food Control* (Vol. 146, p. 109516). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109516>

- Relkin, P., & Shukat, R. (2012). Food protein aggregates as vitamin-matrix carriers: Impact of processing conditions. *Food Chemistry*, 134(4), 2141–2148.
- Ruiz-Espinosa, H., Amador-Espejo, G. G., Barcenas-Pozos, M. E., Angulo-Guerrero, J. O., Garcia, H. S., & Welte-Chanes, J. (2013). Multiple-pass high-pressure homogenization of milk for the development of pasteurization-like processing conditions. *Letters in Applied Microbiology*, 56(2), 142–148.
- Santamaria, M. (2010). *Industria alimentaria. Tecnologías emergentes*. <https://n9.cl/79uh7z>
- Sliwinski, E. L., Roubos, P. J., Zoet, F. D., Van Boekel, M., & Wouters, J. T. M. (2003). Effects of heat on physicochemical properties of whey protein-stabilised emulsions. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 31(1–4), 231–242.
- Sonar, C. R., Paccola, C. S., Al-Ghamdi, S., Rasco, B., Tang, J., & Sablani, S. S. (2019). Stability of color, β -carotene, and ascorbic acid in thermally pasteurized carrot puree to the storage temperature and gas barrier properties of selected packaging films. *Journal of Food Process Engineering*, 42(4), e13074.
- Speroni, F., Szerman, N., & Vaudagna, S. R. (2014). High hydrostatic pressure processing of beef patties: Effects of pressure level and sodium tripolyphosphate and sodium chloride concentrations on thermal and aggregative properties of proteins. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 23, 10–17.
- Stratakos, A. C., Inguglia, E. S., Linton, M., Tollerton, J., Murphy, L., Corcionivoschi, N., Koidis, A., & Tiwari, B. K. (2019). Effect of high pressure processing on the safety, shelf life and quality of raw milk. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 325–333.
- Suzuki, K., Miyosawa, Y., & Suzuki, C. (1963). Protein denaturation by high pressure. Measurements of turbidity of isoelectric ovalbumin and horse serum albumin under high pressure. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 101(2), 225–228. [https://doi.org/10.1016/S0003-9861\(63\)80006-5](https://doi.org/10.1016/S0003-9861(63)80006-5)

- Szerman, N., Ferrari, R., Sancho, A. M., & Vaudagna, S. (2019). Response surface methodology study on the effects of sodium chloride and sodium tripolyphosphate concentrations, pressure level and holding time on beef patties properties. *LWT*, 109, 93–100.
- Torres, J. A., Serment-Moreno, V., Escobedo-Avellaneda, Z. J., Velazquez, G., & Welti-Chanes, J. (2016). Reaction chemistry at high pressure and high temperature. *High Pressure Processing of Food: Principles, Technology and Applications*, 461–478.
- Van Camp, J., & Huyghebaert, A. (1995). High pressure-induced gel formation of a whey protein and haemoglobin protein concentrate. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 111–117. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80021-2](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80021-2)
- Weber, G., & Drickamer, H. G. (1983). The effect of high pressure upon proteins and other biomolecules. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 16(1), 89–112. <https://doi.org/10.1017/S0033583500004935>
- Zhang, H., Patel, J., Bhunia, K., Al-Ghamdi, S., Sonar, C. R., Ross, C. F., Tang, J., & Sablani, S. S. (2019). Color, vitamin C, β -carotene and sensory quality retention in microwave-assisted thermally sterilized sweet potato puree: Effects of polymeric package gas barrier during storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, 100324. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2019.100324>
- Zhang, Z., Li, Y., Lee, M. C., Ravanfar, R., Padilla-Zakour, O. I., & Abbaspourrad, A. (2020). The impact of high-pressure processing on the structure and sensory properties of egg white-whey protein mixture at acidic conditions. *Food and Bioprocess Technology*, 13, 379–389.
- Zhou, H., Vu, G., Gong, X., & McClements, D. J. (2022). Comparison of the cooking behaviors of meat and plant-based meat analogues: Appearance, texture, and fluid holding properties. *ACS Food Science & Technology*, 2(5), 844–851.
- Zipp, A., & Kauzmann, W. (1973). Pressure Denaturation of Metmyoglobin. *Biochemistry*, 12(21), 4217–4228. https://doi.org/10.1021/BI00745A028/SUPPL_FILE/BI00745A028_SI_001.PDF



CAPÍTULO IV

Irradiación

Principios y aplicaciones



CAPÍTULO IV IRRADIACIÓN

Objetivo

El objetivo de este capítulo es presentar los conceptos, efectos y aplicación de la irradiación en las matrices alimentarias.

Definición y fundamentos

Dimensión y nomenclatura

La unidad de medida de las radiaciones ionizantes es el electronvoltio (eV), siendo su equivalencia $1\text{eV} = 1,610^{-19}$ julios. La unidad de dosis absorbida se denomina Gray (Gy) y se define como la energía media comunicada por la radiación ionizante a la materia por unidad de masa ($1\text{Gray} = 1 \text{ julio / kg}$).

Definición y clasificación

Definición

Se conoce como radiación a la energía que viaja en forma de ondas o partículas y que proviene de una fuente emisora.

Clasificación

La radiación se clasifica en ionizante y no ionizante, a saber:

- Radiación no ionizante. Es una forma de energía que se transmite en forma de ondas electromagnéticas, las cuales tienen poca energía. La que contienen no es suficiente para el estímulo molecular o atómico (electrones) (Pathak et al., 2018).

Según Syaza et al. (2017) estas radiaciones no ionizantes tienen una longitud de onda larga (>100 nm) y baja energía fotónica ($<12,4$ eV). Sus frecuencias están en el rango de 0 Hz hasta 10^{15} Hz. En la siguiente tabla se muestra la clasificación de dichas radiaciones electromagnéticas no ionizantes.

Tabla 7
Clasificación de las radiaciones no ionizantes

Tipo	Frecuencia	Efectos
Baja frecuencia.	0-300 KHz	Induce bajas corrientes. No produce calentamiento.
Radio frecuencias.	3 KHz- 300 MHz	Podría inducir altas corrientes. Podría inducir calentamiento.
Micro-ondas.	300 MHz-300 GHz	Induce altas corrientes. Produce calentamiento.
Infrarrojo.	300 GHz-780 nm	Podría producir altas corrientes. Produce calentamiento. Produce excitación de electrones. Produce efectos fotoquímicos.
Luz visible.	780 nm- 400 nm	Efectos ópticos. Produce excitación de electrones. Produce efectos fotoquímicos.
Luz ultravioleta.	400 nm-100 nm	Produce rompimiento de enlaces. Produce daños en el DNA. Puede producir efectos ópticos. Produce excitación de electrones. Produce efectos fotoquímicos.

Fuente: Adaptado de Syaza et al. (2017) y EPA (2023)

Los tratamientos con luz ultravioleta pueden causar la inactivación de microorganismos por formación de lesiones o dímeros de pirimidina que interfieren con material genético del (DNA o ARN). Los rayos rompen las membranas celulares y destruyen el material genético, por lo tanto, no pueden reproducirse provocando la muerte celular. El tratamiento con este tipo de radiación (UV) no produce toxinas, ni residuos de estas, en el proceso y no afecta el sabor, sabor, pH, olor, etc. del producto (McKeen, 2012).

Radiación ionizante. La irradiación ionizante consiste en exponer un objeto o un alimento a una fuente emisora, que emite la energía suficiente para arrancar los electrones más externos de los átomos y moléculas convirtiéndolos en iones o en radicales libres, éstos a su vez reaccionan dando lugar a cambios en el material irradiado. Estas reacciones son las responsables de la destrucción de microorganismos, insectos y parásitos (Calderón, 2000; Gelvez, 2005; Sendra et al., 2001). Según Khan et al. (2019) hacen parte de la radiación ionizante los rayos X, los rayos gamma y los haces de electrones los cuales tienen suficiente energía para causar la ionización.

La OMS (1981) clasifica las radiaciones ionizantes según la dosis, así:

- **Dosis baja (hasta 1 kGy):** Para demorar los procesos fisiológicos, como maduración y senescencia de frutas frescas y vegetales, y para controlar insectos y parásitos.
- **Dosis media (hasta 10 kGy):** Para inactivar los microorganismos patógenos y alterantes en distintos alimentos y extender su vida útil y para mejorar ciertas propiedades tecnológicas de los alimentos (Por ejemplo: reducir los tiempos de cocción de vegetales deshidratados).
- **Dosis alta (superior a 10 kGy):** Para la esterilización de carne roja, pollo, marisco y pescado, y otras preparaciones en combinación con un leve calentamiento; para inactivar enzimas y para la desinfección de ciertos alimentos o ingredientes como las especias. Estas dosis destruyen o reducen al máximo las poblaciones de organismos patógenos, por ejemplo: bacterias tanto Gram positivas como Gram negativas y virus.

El tratamiento con estas dosis recomendadas no da lugar a radioactividad inducida en los alimentos (Fellows, 2000; Furuta et al., 1988; Thayer, 1993). Además, la energía ionizante produce pocos efectos negativos sobre los alimentos ya que no se han encontrado compuestos radiolíticos diferentes de los compuestos formados por otros tratamientos de procesamiento aplicados a los alimentos (Crawford & Ruff, 1996).

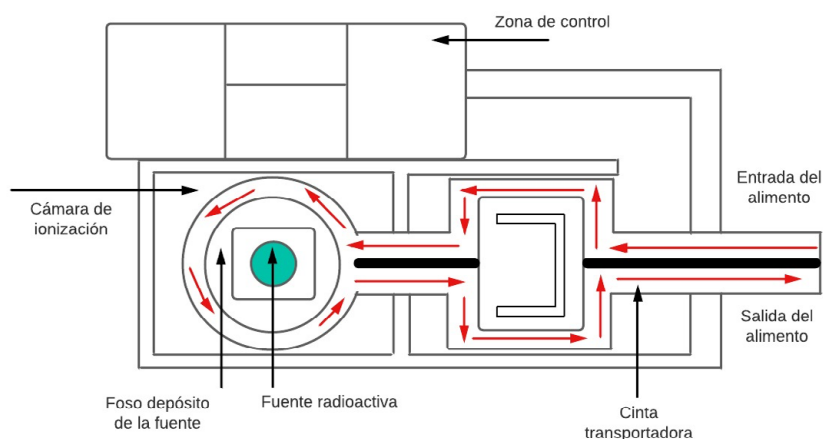
a. Generación de irradiación

El poder de penetración de los rayos gamma y los rayos X son lo mismo, se clasifican en función de su origen. Los rayos X se originaron a partir de electrones nucleares adicionales, mientras que los rayos gamma se originaron en el núcleo de un átomo (G.-L. Cho & Ha, 2019).

Los rayos gamma tienen alta frecuencia y energía, son muy penetrantes dado que sus fotones tienen mayor recurrencia y energía. Produce esterilización o descontaminación al romper los enlaces covalentes de virus y ADN bacteriano (Erramli & El Asri, 2019; Pathak et al., 2018; Pricaz & Uță, 2015).

En general, la irradiación ionizante por rayos gamma se lleva a cabo en grandes cámaras (cámara de ionización) que contiene barras de ^{60}Co en el centro, con objeto de que la emisión gamma emita en todas las direcciones, los alimentos se colocan en una cinta transportadora que circula en torno a la fuente (Figura 10). La dosis de radiación absorbida por el alimento depende del tiempo de exposición del mismo a la fuente. Como norma obligatoria general, la fuente de irradiación, si es radioactiva, debe permanecer en una piscina de agua desionizada cuando no está en funcionamiento y bajo unas condiciones especiales de seguridad.

Figura 12
Esquema de una instalación de irradiación por rayos gamma (^{60}Co)



Fuente: Elaboración propia (2022)

Las fuentes de irradiación autorizadas para alimentos son de dos tipos:

Fuentes mecánicas. Son equipos eléctricos que se clasifican por la radiación emitida.

- Equipos generadores de rayos X.
- Equipos generadores de electrones acelerados.

Sustancias radiactivas. ^{60}Co y ^{137}Cs . Las fuentes más usadas son los radioisótopos, en Europa el único autorizado es el ^{60}Co , que se obtiene bombardeando con neutrones el ^{59}Co en un reactor nuclear.

Efectos de la aplicación de irradiación

Las radiaciones ionizantes (rayos X, gamma y haces de electrones) tienen impactos comunes sobre los patógenos y la calidad del producto (en dosis similares). Estas afectan de forma directa o indirecta: en los efectos directos, los componentes celulares (carbohidratos, el ADN y los lípidos) sufren daños directos, mientras que en los efectos indirectos, los radicales libres y las especies reactivas (hidroelectrones, átomos de hidrógeno o radicales hidroxilo) productos de la radiólisis del agua reaccionan con las células o los componentes del material tratado. Dado que en los productos frescos el principal componente es el agua, el efecto indirecto es el mecanismo principal para la transición de la irradiación ionizante (Fan & Wang, 2021).

El efecto de la radiación sobre los componentes de los alimentos es muy variado debido a la distinta naturaleza de cada uno de ellos y depende, además, de una serie de variables intrínsecas (pureza, presencia del compuesto, sólo o en compañía de otro, aw, humedad, etc.) y extrínsecas (condiciones del proceso: temperatura, presencia de O_2 , etc.) (Calderón, 2000). Las radiaciones ionizantes también son útiles para inactivar patógenos en varios productos alimenticios (Jeong et al., 2015)

A continuación, se listan los fenómenos más relevantes que ocurren en la aplicación de irradiación en los alimentos.

Tabla 8
Relación de los principales efectos de la radiolisis en alimentos

	Efecto	Clasificación	Producto
Irradiación	Radiolisis	Primario	Ionización.
			Ruptura de los átomos.
			Perdida de estabilidad de los átomos.
			Producción de radicales libres.
		Secundario	Combinación de radicales libres.
			Formación de compuestos.

Fuente: Calderón (2000)

La energía radiante produce ionización, ruptura y pérdida de la estabilidad de los átomos y/o moléculas del alimento con el que interacciona. A este proceso suele denominarse efecto primario; como consecuencia de esta desestabilización aparecen iones y radicales libres que se combinan entre sí o con otras moléculas para formar sustancias ajenas a la composición inicial del producto. Esto se denomina efecto secundario, que se prolonga en el alimento, con formación y desaparición de compuestos hasta lograr la producción de compuestos químicamente estables. Al conjunto de estos efectos (primario y secundario) se denomina radiólisis y los nuevos compuestos originados en cantidades pequeñas son los productos radiolíticos.

Estos últimos no presentan riesgos para la salud, su producción puede evitarse mediante la disminución del oxígeno del ambiente, la reducción de temperatura, disminución del pH y reducción del contenido de agua del producto. Cuando en el alimento ocurren cambios definitivos y/o se generan productos radiolíticos, se les llama marcadores y pueden ser definidos por la presencia de una nueva molécula, una nueva racemización, un nuevo radical libre, un nuevo estado de valencia o una nueva propiedad (Calderón, 2000). Todos ellos constituyen la base principal de los métodos existentes para la detección de productos irradiados. El efecto sobre las moléculas es tanto mayor cuanto mayor

es su tamaño. Los ácidos nucleicos (material genético) son las moléculas más complejas de las células, por tanto, la posibilidad de que sufran daños directos es muy elevada (Narváiz et al., 1992).

Tabla 9
Efectos de la irradiación gamma en los componentes de los alimentos

Producto	Componente	Efecto	Características	Autor
Alimento	Agua	Moléculas excitadas.	H_2O^*	(Goodman et al., 1989)
		Ionización (iones y cationes).	$H_2O^+ + e^-_{ac}$	
		Disociación (radicales libres).	$H_2O \cdot + H \cdot$	
	Fenoles y ácidos fenólicos	Oxidación.	Hidroxilaciones.	(Grootveld et al., 1990)
	ADN	Oxidación.	Alteraciones en las bases del compuesto.	
	Grasas	Oxidación.	Rancidez.	(Lebovics et al., 1992) (Alfaia et al., 2007)
	Vitaminas y pigmentos	Degradación.		(Thayer, 1993)
	Proteínas	Cambios conformaciones.	Reducción de la viscosidad Pérdida de propiedades-desnaturalización.	(Lee et al., 2003) (Fennema et al., 2017) (Alfaia et al., 2007)
		Oxidación de aminoácidos.		
		Ruptura de enlaces covalentes.		
		Formación de radicales libres.		
		Formación de agregados de alto peso molecular.	Generación de enlaces cruzados, interacciones hidrofóbicas, electrostáticas y formación de puentes disulfuro.	

Fuente: Elaboración propia (2022)

Como se observa en la tabla anterior, la interacción de la radiación incidente sobre la molécula de agua, favorece la creación de moléculas excitadas (moléculas en los más altos estados de energía interna), la ionización (cationes

y aniones) por pérdida de un electrón (e^-)^o disociación (radicales libres) por ruptura de un enlace de hidrógeno. La repercusión de estos radicales, es tan importante que se considera que el efecto secundario es mucho más intenso cuanto mayor es el contenido acuoso. En general, todos estos compuestos son muy reactivos (Calderón, 2000).

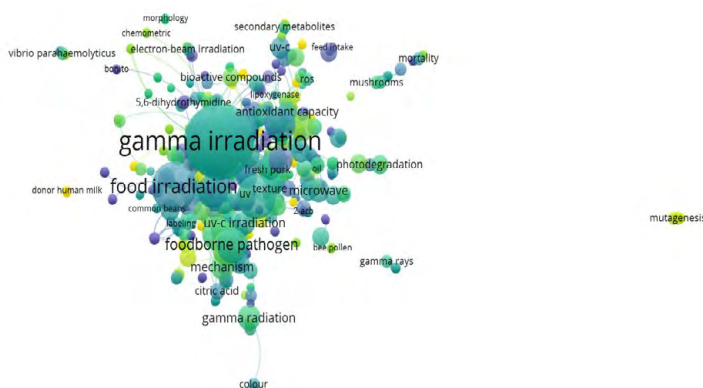
En los alimentos, los compuestos radiolíticos se pueden predecir a partir de la composición de dicho alimento ya que son idénticos a los que se forman por otras vías (Basson, 1983; Elias, 1980; Grootveld et al., 1990) como son la acción enzimática, la oxidación lipídica (Lebovics et al., 1992) y la degradación de vitaminas liposolubles y pigmentos (Sendra et al., 2001; Thayer, 1993).

Estado del arte

A continuación, se presenta la cuantificación de los estudios de irradiación en alimentos en los últimos cinco años. Se puede observar que en este periodo se han realizado alrededor de 497 estudios, siendo esta China el mayor productor con 108, seguido de Corea de Sur con 69 y Estados Unidos con 55. Así mismo, se verifica que el centro con mayores estudios es la Universidad de Jiangnan en China y el autor con mayor producción es Ja, JW. Así mismo, se puede ver que durante el año 2020 se registró el mayor número de artículos.

Figura 13

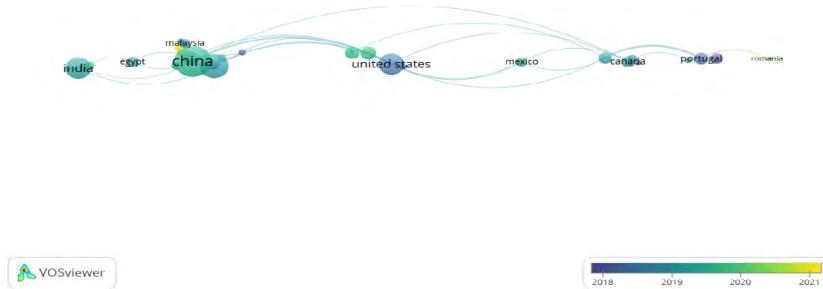
Resultados de estudio bibliométrico con palabras clave sobre la aplicación de irradiación en matrices alimentarias.



Fuente: Elaboración propia (2022)

Figura 14

Resultados de estudio bibliométrico sobre la investigación por países en la aplicación de irradiación en alimentos.



Fuente: Elaboración propia (2022)

Efectos en las matrices alimentarias

No se pueden generalizar los efectos de las radiaciones ionizantes si no se especifica la dosis, condiciones y producto. La temperatura y la presencia de oxígeno son determinantes de los efectos del tratamiento (Diehl, 1992). Utilizando la dosis adecuada pueden mantenerse las propiedades organolépticas en gran medida; sin embargo, al aplicar dosis elevadas se producen en el alimento modificaciones del sabor, color y textura que pueden hacerlo inaceptable para el consumo. En general, las alteraciones organolépticas se presentan a dosis menores que las que producen alteraciones nutricionales.

Uno de los cambios organolépticos más característicos es la aparición de un olor y/o sabor típico a radiación, debido, al efecto de los radicales libres sobre lípidos y proteínas. El aroma extraño es más pronunciado inmediatamente después de la irradiación y decrece e incluso desaparece durante el almacenamiento o después de cocinar el producto. El color del producto también puede verse afectado (p.e. oscurecimiento de la carne). En frutas y hortalizas se produce un considerable ablandamiento que no se presenta de inmediato, sino al cabo de varias horas e incluso días después de recibir la irradiación (Narvaiz et al., 1992).

La aplicación de la irradiación con control de la temperatura y del ambiente gaseoso y unas condiciones adecuadas de almacenamiento son los métodos idóneos para minimizar los cambios que se producen al irradiar (Kilcast, 1990).

Según Cook et al. (2017) y Pimenta et al. (2016) la radiación gamma es un método libre de químicos y reduce la carga viral de productos alimenticios y el agua. Además, contribuye a reducir las pérdidas poscosecha inducidas por hongos en frutas y hortalizas frescas (Ashtari et al., 2019; Jeong et al., 2016).

Se han llevado a cabo muchos estudios para evaluar el efecto de la irradiación en los alimentos y sus componentes, como se dijo anteriormente cada alimento o componente debe ser estudiado por separado. Su comportamiento será definido por las condiciones de tratamiento; a continuación, se citan algunos de los principales estudios realizados:

Al estudiar el efecto de la irradiación sobre soluciones de glucosa se observó que se formaban muchos productos, tanto en presencia como en ausencia de oxígeno, los cuales también están presentes en alimentos no irradiados (Beyers & Austin, 1979; Simic, 2018). Por otro lado, la irradiación (0,5, 10, 20 y 30 kGy) de mezclas de lisina y diversos azúcares favorece el pardeamiento, dependiendo de la concentración, la dosis y la temperatura. Además, se observó que a 30 kGy la sacarosa aumenta su reactividad y produce pardeamiento (Oh et al., 2005). El almidón irradiado experimenta cierta degradación por la desintegración de los enlaces glicosídicos (Simic, 2018).

Los radicales libres formados al irradiar (50 kGy / $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) carne roja disminuyen a las 8 horas de conservarlas a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y desaparecen una vez descongelados (Taub et al., 1978). En cambio, se produce un aumento del 516 % en el índice de peróxidos de carne de arenque tratada a 3 kGy pero no se observó ningún efecto en las ratas alimentadas con este arenque (Anukaramonta et al., 1981; Gower & Wills, 1985). La carne de pollo irradiada (45 a 60 kGy / $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$) contiene la misma cantidad de aminoácidos que las muestras congeladas o tratadas a $115\text{ }^{\circ}\text{C}$; de igual manera, no se encontraron diferencias significativas en la cantidad de ácidos grasos totales, ácidos grasos libres, grasa y peróxidos, pero el índice de ácido tiobarbitúrico

de las muestras tratadas por irradiación o por calor difiere significativamente de las muestras congeladas (Thayer, 1993).

La irradiación (0,5 a 5 kGy) afectó la textura de pechugas de pollo, las cuales presentaron mayores pérdidas de cocción y la resistencia al corte se mantuvo constante durante 14 días de almacenamiento a 4 °C. La irradiación produce la contracción de la amplitud de los sarcómeros y el rompimiento de las miofibrillas lo cual favorece el endurecimiento de este tipo de productos (Yoon, 2003).

La viscosidad de mezclas de caseinato o soja con glicerol (1:1 y 2:1 p/p) se reduce a medida que la dosis aumenta (5 a 25 kGy), mientras que en las mezclas de caseinato y suero la viscosidad permanece constante (Sabato & Lacroix, 2002). La irradiación (10 kGy) de harina de sorgo aumenta la digestibilidad de las proteínas entre un 12 y 18 %; a altas dosis se mantiene la digestibilidad, pero disminuye su solubilidad; la irradiación disminuye la claridad de la harina y de los granos de sorgo y toman una tonalidad amarillenta, lo cual puede ser indicativo de la formación de reacciones de Maillard (Fombang et al., 2005).

En frutas se detecta una pérdida insignificante de niacina, tiamina, riboflavina y β -caroteno (Cast, 2004). Sin embargo, las pérdidas de ácido ascórbico variaron de 0 a 95% dependiendo del producto, variedad, duración de la dosis de irradiación y temperatura de almacenamiento; pero se encontró que el ácido ascórbico se convierte en ácido dehidroascórbico, el cual es metabolizado por la misma ruta del ácido ascórbico y juntos se consideran como una forma de vitamina (Fox et al., 1989; Kraybill, 1982; Tobback, 1977). Fox et al., (1989) estudiaron el efecto de la irradiación (0 a 6,65 kGy / -20, -10, 0, 10 y 20 °C) en diversas vitaminas hidrosolubles. Los resultados demostraron que la carne de cerdo irradiada a 0° C con 1 kGy o 6,65 kGy tuvo una reducción en el contenido de tiamina de 17,5 y 65,6 % respectivamente, mientras que el pollo irradiado a 6,65 kGy perdió el 36,9 % de su tiamina.

En el huevo líquido congelado e irradiado (2 kGy / 15 °C) se observó que no existe diferencia significativa en el contenido de 18 aminoácidos, vitaminas A, B¹, B² y caroteno ni en la viscosidad al comparar las muestras con huevo no tratado. Además, el consumo durante 70 días del producto irradiado no afectó

el apetito, ni el peso corporal, no tuvo efectos psicológicos, bioquímicos, ni endocrinos en un grupo de 58 personas (Fengmei et al., 2000).

Gelvez (2005) evaluó en efecto combinado de la radiación (1, 3 y 8 kGy) el pH (5,5 y 7,0) y las condiciones de almacenamiento (4 y 20°C) sobre las características reológicas, color, digestibilidad *in vitro*, oxidación lipídica y la supervivencia de bacterias inoculadas (*S. Enteritidis* y *L. Innocua*) de una crema elaborada con yema de huevo (30%).

Encontraron que la dosis de 8 kGy y pH ácido se produce destrucción de la estructura del gel, mientras que a pH neutro se forman agregados de alto peso molecular, aumenta el índice de flujo, las muestras adquieren carácter plástico, aumenta la viscosidad lo cual puede ser debido a que como consecuencia de los tratamientos por irradiación gamma las proteínas se afectan de diferente manera causando cambios conformacionales, oxidación de los aminoácidos, ruptura de enlaces covalentes, y formación de radicales libres, rompimiento de las cadenas peptídicas si las dosis son bajas.

Mientras, que las dosis altas producen fragmentación y agregación, transformando las proteínas en agregados de alto peso molecular por la generación de enlaces cruzados, interacciones hidrofóbicas, electrostáticas y formación de puentes disulfuro. La formación de estos agregados incrementa al aumentar la dosis (Cho & Song, 2000; Davies et al., 1987; Fennema et al., 2017; Filiali-Mouhim et al., 1997; Le Maire et al., 1990; Lee et al., 2005; Lee & Song, 2002; Schuessler & Schilling, 1984).

Además, estos comportamientos pueden deberse a que las reacciones secundarias causadas por la irradiación sí se producen a pH más altos (Calderón, 2000), pero difieren según la dosis. En el color encontró que aumentar la dosis de irradiación aumenta la claridad de las cremas, mientras que los parámetros a^* y b^* se comportan de forma inversa, aumentan a pH neutro y disminuyen a pH bajo. Se observó más sensibilidad en el cambio de color a pH bajo; estos resultados pueden deberse a la degradación de los carotenoides, dicha degradación se ve potenciada con la dosis y en una manera similar a la formación de hidroperóxidos (Pinto et al., 2004). En la digestibilidad proteica *in vitro*, no observaron efectos del tratamiento en ninguna dosis.

En cuanto a la oxidación encontraron que la irradiación promueve la producción de hexanal y nonanal, y a su vez ésta se ve influenciada por el pH y la temperatura de almacenamiento, lo inmediatamente anterior debido a que por el efecto de la irradiación se produce la expulsión de electrones de los últimos niveles moleculares y, por ende, la rotura de enlaces, creándose de esta manera radicales libres que pueden reaccionar con otros componentes en el alimento y generar otros radicales o estabilizarse en materiales cristalinos u otras matrices de polímeros. El elevado contenido de agua y proteínas y la relativa alta concentración de ácidos grasos insaturados como el oleico y linoléico (40,1 % y 18,0 % del total de ácidos grasos) son factores muy importantes en este comportamiento.

En lo que respecta a la oxidación de los ácido oleico y linoleico, al formarse radicales libres por efecto de la irradiación, en primera estancia a partir del agua, se promueve el inicio de este proceso, pues el oxígeno ataca con mayor facilidad las posiciones adyacentes a los dobles enlaces de los ácidos grasos mencionados (Nielsen et al., 1997). Los radicales que reaccionan con el oxígeno se transforman en radicales peróxidos, que evolucionan a hidroperóxidos y nuevos radicales que pueden seguir extendiendo la reacción (Rodríguez et al., 2000). Estos hidroperóxidos son moléculas inodoras, muy inestables que se descomponen en diversos productos secundarios de la oxidación tales como aldehídos, como hexanal y nonanal. En las baterías inoculadas se observó que las dosis de 3 y 8 kGy causan letalidad total, mientras que en las muestras tratadas a 1 kGy presentan reducción de la carga de bacterias, incluyendo las mesófilas, que se recuerdan con el paso del tiempo de almacenamiento.

Alfaia et al. (2007) investigaron el efecto de la radiación gamma (7 kGy) sobre el músculo *longissimus thoracis* de cordero congelada. Evaluaron el contenido de lípidos, la composición de ácidos grasos y el perfil de ácido linoléico conjugado (CLA). Encontraron que la irradiación no modifica la cantidad de lípidos totales, el perfil de ácidos grasos y contenido de CLA. Por otro lado, la pérdida del valor nutricional de los ácidos grasos contenidos en la carne no resulta significativa.

Arshad et al. (2020) investigaron el efecto de la irradiación ionizante con haz de electrones a diferentes dosis (0, 3 y 7 kGy) sobre la microbiota; las características y fisicoquímicas y el perfil de ácidos grasos de la carne de

pato congelada. Encontrando que la dosis de 3 kG y permitió la eliminación de la carga bacterianas totales y de coliforme s. Además, reportaron que el incremento de la dosis aumentó la cantidad de metamioglobina.

En el color, el tratamiento con altas dosis genera reducción de los parámetros L y a^* , mientras que produce el efecto contrario en el parámetro b^* , resultados que fueron atribuidos a que la radicación produce compuesto de carácter oxidan y reductor como producto de la hidrólisis del agua, así mismo la irradiación del metamioglobina y sulfomioglobina produciendo radicales hidróxido y radicales sulfihidrido que reaccionan con los sitios de unión libre de la mioglobina, por otro lado, podría estar relacionado con la desintegración del Nitrosilhemocromo debido al tratamiento (Garcia-Marquez et al., 2012; Giroux et al., 2001; Ham et al., 2017).

En cuanto a la producción de peróxidos, ácido tiobarbitúrico y Nitrógeno básico total se observó que este aumentó solo a dosis de 7 kGy, ya que esta promueve la oxidación de lípidos y que es inducida por los grupos carbonilos e hidróxidos formados, la desintegración de peróxidos e integración con moléculas nucleofilas (Aubourg et al., 2004; Ham et al., 2017). Por su parte las vitaminas A y E fueron reducidas a mínimas dosis en los tratamientos de 3 y 7 kGy ocasionado por la oxidación que conduce a la pérdida de vitaminas (Mohamed & El-Deen, 2016). En el perfil de ácidos grasos (saturado, mono y poliinsaturados) determinaron que el contenido de estos se reduce significativamente con el incremento de la dosis, debido al reemplazo en los dobles enlaces de estos por especies radicales más reactivas producidas por la radiación ionizante (Brito et al., 2002).

Otoo et al. (2022) investigaron el efecto de la radiación gamma (2,5, 5,0 y 7,5 kGy/ 4) sobre el contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) de la carne de gallina de Guinea ahumada y se estimó el riesgo que dichos hidrocarburos policíclicos representan para la salud de los seres humanos. Encontraron que la irradiación gamma redujo significativamente ($p \leq 0,05$) las concentraciones de PAH individuales, PAH totales, CPAH (PAH cancerígenos) e índice PAH4 (los primeros cuatro PAH conocidos como cancerígenos) y la reducción fue generalmente mayor a mayor dosis de tratamiento; Además, reportaron que se produjo reducción de los PAH de alto peso molecular y aumento de los PAH de bajo peso molecular como resultado del rompimiento de los anillos bencénicos por los rayos gamma (Khalil et al., 2016).

En cuanto al equivalente tóxico total (carcinógenos humanos probables) fueron reducidos significativamente, indicando la alta potencia de los rayos gamma para reducir los PAH y sus derivados cancerígenos.

Zhao et al. (2023) evaluaron el efecto de la irradiación (0, 2, 4, 7, 10 kGy/-20°C) con haz de electrones sobre la composición nutricional, contenidos de aminoácidos, propiedades bioquímicas (TBARS y TVB-N), propiedades físicas (color y textura), los atributos sensoriales de camarón (*Penaeus vannamei*). Encontraron que no se detectan efectos de la irradiación, en ninguna dosis, sobre el contenido de humedad, cenizas y proteína y aminoácidos, aunque el contenido de lisina, leucina y ácido glutámico disminuyeron ligeramente con un aumento de la dosis. Por su parte, el contenido de nitrógeno básico volátil total (TVB-N) solo se vio disminuido a dosis de 10 kGy; así mismo, las dosis altas de tratamiento disminuyeron el contenido de ácidos grasos insaturados y aumentaron los saturados.

En cuanto a la oxidación lipídica encontraron que esta aumenta con la dosis de irradiación. El contenido de vitamina E tiene el efecto contrario, es decir, disminuye con el aumento de la dosis. En el color, los parámetros de color *L* y *b** aumentaron y *a** disminuyó produciendo valores mayores de ΔE , debido a la desnaturalización de proteínas miofibrilares y sarcoplásmicas y a que en los camarones los cambios de color se deben a la degradación de la astaxantina y la oxidación de lípidos, también ocurre por efecto de la irradiación el cambio en la estructura y conformación de la proteína con la consecuente liberación, isomerización y degradación oxidativa de la astaxantina de las carotenoproteínas (Gringer et al., 2020; Kuan et al., 2013; Lopkulkiart et al., 2009; Sundararajan et al., 2011; Xiao et al., 2011).

Bibliografía

- Alfaia, C. M. M., Ribeiro, P. J. L. C., Trigo, M. J. P., Alfaia, A. J. I., Castro, M. L. F., Fontes, C. M. G. A., Bessa, R. J. B., & Prates, J. A. M. (2007). Irradiation effect on fatty acid composition and conjugated linoleic acid isomers in frozen lamb meat. *Meat Science*, 77(4), 689–695. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.05.025>
- Anukaramamonta, T., Temcharoen, P., Nagara, B. N., Chudhabuddhi, C., & Bhamarapavati, N. (1981). Wholesomeness study of irradiated salted and dried mackerel in rats. *Technical Document (IAEA)*. <https://doi.org/10.3/JQUERY-UIJS>
- Arshad, M. S., Kwon, J., Ahmad, R. S., Ameer, K., Ahmad, S., & Jo, Y. (2020). Influence of E-beam irradiation on microbiological and physicochemical properties and fatty acid profile of frozen duck meat. *Food Science & Nutrition*, 8(2), 1020–1029.
- Ashtari, M., Khademi, O., Soufbaf, M., Afsharmanesh, H., & Sarcheshmeh, M. A. A. (2019). Effect of gamma irradiation on antioxidants, microbiological properties and shelf life of pomegranate arils cv.'Malas Saveh'. *Scientia Horticulturae*, 244, 365–371.
- Aubourg, S. P., Pérez-Alonso, F., & Gallardo, J. M. (2004). Studies on rancidity inhibition in frozen horse mackerel (*Trachurus trachurus*) by citric and ascorbic acids. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 106(4), 232–240.
- Basson, R. A. (1983). Advances in radiation chemistry of food and food components--an overview. *Recent Advances in Food Irradiation / Edited by P.S. Elias and A.J. Cohen*. <https://doi.org/10.3/JQUERY-UIJS>
- Beyers, M., & Austin, C. T. (1979). γ Irradiation of Subtropical Fruits. 4. Changes in Certain Nutrients Present in Mangoes, Papayas, and Litchis During Canning, Freezing, and γ Irradiation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 27(1), 48–51. <https://doi.org/10.1021/jf60221a036>

- Brito, M. S., Villavicencio, A. L. C. H., & Mancini-Filho, J. (2002). Effects of irradiation on trans fatty acids formation in ground beef. *Radiation Physics and Chemistry*, 63(3–6), 337–340.
- Calderón, T. (2000). *La irradiación de alimentos. Principios, realidades y perspectivas de futuro*. McGraw-Hill Interamericana de España. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=70312>
- Cast. (2004). Irradiation of plant products. *Irradiation as a Phytosanitary Treatment of Food and Agricultural Commodities*.
- Cho, G.-L., & Ha, J.-W. (2019). Application of X-ray for inactivation of foodborne pathogens in ready-to-eat sliced ham and mechanism of the bactericidal action. *Food Control*, 96, 343–350.
- Cho, Y.-S., & Song, K.-B. (2000). Effect of γ -irradiation on the molecular properties of bovine serum albumin and β -lcatoglobulin. *BMB Reports*, 33(2), 133–137.
- Cook, S. L., Bull, S. P., Methven, L., Parker, J. K., & Khutoryanskiy, V. V. (2017). Mucoadhesion: A food perspective. *Food Hydrocolloids*, 72, 281–296. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.05.043>
- Crawford, L. M., & Ruff, E. H. (1996). A review of the safety of cold pasteurization through irradiation. In *Food Control* (Vol. 7, Issue 2, pp. 87–97). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/0956-7135\(96\)00004-7](https://doi.org/10.1016/0956-7135(96)00004-7)
- Davies, K. J., Delsignore, M. E., & Lin, S. W. (1987). Protein damage and degradation by oxygen radicals. II. Modification of amino acids. *Journal of Biological Chemistry*, 262(20), 9902–9907.
- Diehl, J. F. (1992). Food irradiation: Is it an alternative to chemical preservatives? *Food Additives and Contaminants*, 9(5), 409–416. <https://doi.org/10.1080/02652039209374092>
- Elias, P.S. (1980). The wholesomeness of irradiated food. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 4(2), 172–183. [https://doi.org/10.1016/0147-6513\(80\)90017-2](https://doi.org/10.1016/0147-6513(80)90017-2)

- Erramli, H., & El Asri, J. (2019). Gamma rays: applications in environmental gamma dosimetry and determination samples gamma-activities induced by neutrons. *Use of Gamma Radiation Techniques in Peaceful Applications*, 109.
- Fan, X., & Wang, W. (2021). Quality of fresh and fresh-cut produce impacted by nonthermal physical technologies intended to enhance microbial safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(2), 362–382.
- Fellows, P. (2000). Food Processing Technology – Principles and Practice. In *Pasteurisation*. <https://doi.org/10.1201/NOE0849308871>
- Fengmei, L., Yongbao, G., & Dianhua, C. (2000). Study on radiation preservation of frozen egg liquid. *Radiation Physics and Chemistry*, 57 (3–6), 341–343. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(99\)00401-6](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(99)00401-6)
- Fennema, O. R., Damodaran, S., & Parkin, K. L. (2017). *Amino Acids, Peptides, and Proteins* (pp. 235–356). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315372914-6>
- Filali-Mouhim, A., Audette, M., St-Louis, M., Thauvette, L., Denoroy, L., Penin, F., Chen, X., Rouleau, N., Le Caer, J., Rossier, J., Potier, M., & Le Maire, M. (1997). Lysozyme fragmentation induced by gamma-radiolysis. *International Journal of Radiation Biology*, 72(1), 63–70.
- Fombang, E. N., Taylor, J. R. N., Mbofung, C. M. F., & Minnaar, A. (2005). Use of γ -irradiation to alleviate the poor protein digestibility of sorghum porridge. *Food Chemistry*, 91(4), 695–703. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.06.042>
- Fox, J. B., Thayer, D. W., Jenkins, R. K., Phillips, J. G., Ackerman, S. A., Beecher, G. R., Holden, J. M., Morrow, F. D., & Quirbach, D. M. (1989). Effect of gamma irradiation on the b vitamins of pork chops and chicken breasts. *International Journal of Radiation Biology*, 55(4), 689–703. <https://doi.org/10.1080/09553008914550721>
- Furuta, M., Katayama, T., Toratani, H., & Takeda, A. (1988). Preliminary examination of induced radioactivity in peppers by 10 MeV-electron

irradiation. *Shokuhin Shosha*, 23(2), 93–99. http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:20059973

Garcia-Marquez, I., Cambero, M. I., Ordonez, J. A., & Cabeza, M. C. (2012). Shelf-life extension and sanitation of fresh pork loin by E-beam treatment. *Journal of Food Protection*, 75(12), 2179–2189.

Gelvez Ordoñez, V. M. (2005). *Elaboracion de crema de huevo mediante alta presion isostatica e irradiación* [Universitat Autònoma de Barcelona]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=231298&info=resumen&idioma=SPA>

Giroux, M., Ouattara, B., Yefsah, R., Smoragiewicz, W., Saucier, L., & Lacroix, M. (2001). Combined effect of ascorbic acid and gamma irradiation on microbial and sensorial characteristics of beef patties during refrigerated storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(2), 919–925.

Goodman, B. A., McPhail, D. B., & Duthie, D. M. L. (1989). Electron spin resonance spectroscopy of some irradiated foodstuffs. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 47(1), 101–111. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740470112>

Gringer, N., Skytte, J. L., Dang, T. T., Orlie, V., Olsen, K., Schlippè-Steffensen, K., & Jessen, F. (2020). Effect of ice maturation, freezing and heat treatment on the peelability and quality of cold water shrimps (*Pandalus borealis*). *LWT*, 134, 110139.

Grootveld, M., Jain, R., Claxson, A. W. D., Naughton, D., & Blake, D. R. (1990). The detection of irradiated foodstuffs. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 1, Issue C, pp. 7–14). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/0924-2244\(90\)90003-H](https://doi.org/10.1016/0924-2244(90)90003-H)

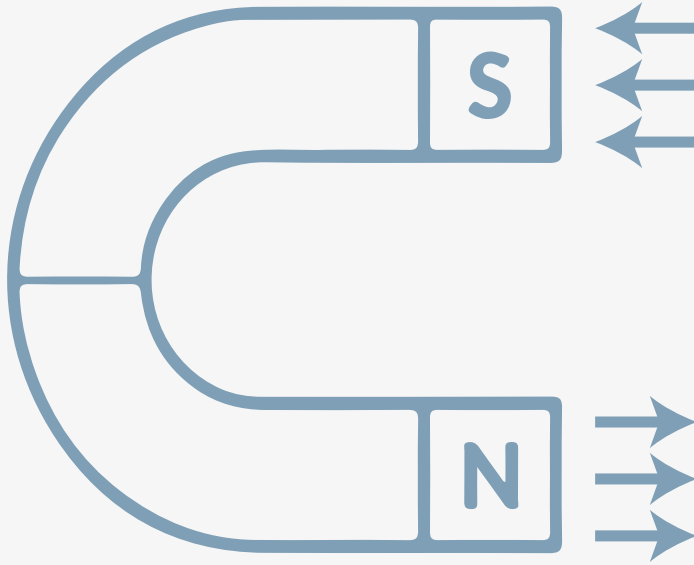
Ham, Y.-K., Kim, H.-W., Hwang, K.-E., Song, D.-H., Kim, Y.-J., Choi, Y.-S., Song, B.-S., Park, J.-H., & Kim, C.-J. (2017). Effects of irradiation source and dose level on quality characteristics of processed meat products. *Radiation Physics and Chemistry*, 130, 259–264.

- Jeong, R.-D., Chu, E.-H., Lee, G. W., Cho, C., & Park, H.-J. (2016). Inhibitory effect of gamma irradiation and its application for control of postharvest green mold decay of Satsuma mandarins. *International Journal of Food Microbiology*, 234, 1–8.
- Jeong, R.-D., Shin, E.-J., Chu, E.-H., & Park, H.-J. (2015). Effects of ionizing radiation on postharvest fungal pathogens. *The Plant Pathology Journal*, 31(2), 176.
- Khalil, A., Albachir, M., & Odeh, A. (2016). Effect of gamma irradiation on some carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in wheat grains. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 36(5), 873–883.
- Khan, S., Sayed, M., Sohail, M., Shah, L. A., & Raja, M. A. (2019). Advanced oxidation and reduction processes. *Advances in Water Purification Techniques*, 135–164.
- Kilcast, D. (1990). *Irradiation of packaged food*. Royal Society of Chemistry. http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:22089669
- Kraybill, H. F. (1982). Effect of processing on nutritive value of food: Irradiation. In J. . Recheigl (Ed.), *Handbook of Nutritive Value of Processed Foods* (firts). CRC Press.
- Kuan, Y.-H., Bhat, R., Patras, A., & Karim, A. A. (2013). Radiation processing of food proteins—A review on the recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 30(2), 105–120.
- Le Maire, M., Thauvette, L., De Foresta, B., Viel, A., Beauregard, G., & Potier, M. (1990). Effects of ionizing radiations on proteins. Evidence of non-random fragmentations and a caution in the use of the method for determination of molecular mass. *Biochemical Journal*, 267(2), 431–439.
- Lebovics, V. K., Gaál, Ö., Somogyi, L., & Farkas, J. (1992). Cholesterol oxides in γ -irradiated spray-dried egg powder. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 60(2), 251–254. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740600214>

- Lee, M., Lee, S., & Song, K. Bin. (2005). Effect of γ -irradiation on the physicochemical properties of soy protein isolate films. *Radiation Physics and Chemistry*, 72(1), 35–40.
- Lee, S., Lee, S., & Song, K. Bin. (2003). Effect of gamma-irradiation on the physicochemical properties of porcine and bovine blood plasma proteins. *Food Chemistry*, 82(4), 521–526. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00592-7](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00592-7)
- Lee, Y.-W., & Song, K.-B. (2002). Effect of γ -irradiation on the molecular properties of myoglobin. *BMB Reports*, 35(6), 590–594.
- Lopkulkiaert, W., Prapatsornwattana, K., & Rungsardthong, V. (2009). Effects of sodium bicarbonate containing traces of citric acid in combination with sodium chloride on yield and some properties of white shrimp (*Penaeus vannamei*) frozen by shelf freezing, air-blast and cryogenic freezing. *LWT-Food Science and Technology*, 42(3), 768–776.
- McKeen, L. (2012). Introduction to food irradiation and medical sterilization. *The Effect of Sterilization on Plastics and Elastomers*, 1.
- Mohamed, W. S., & El-Deen, A. M. E. (2016). Inhibition of *Escherichia coli* 0157: H7 Growth by Gamma Radiation Improves the Hygienic Quality of Chilled Fresh Beef Meat. *Pakistan Journal of Zoology*, 48(5).
- Narvaiz, P., Lescano, G., & Kaiyriyama, E. (1992). Physicochemical and sensory analyses on egg powder irradiated to inactivate salmonella and reduce microbial load. *Journal of Food Safety*, 12(4), 263–282. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4565.1992.tb00083.x>
- Nielsen, J. H., Sørensen, B., Skibsted, L. H., & Bertelsen, G. (1997). Oxidation in pre-cooked minced pork as influenced by chill storage of raw muscle. *Meat Science*, 46(2), 191–197.
- Oh, S.-H., Lee, Y.-S., Lee, J.-W., Kim, M. R., Yook, H.-S., & Byun, M.-W. (2005). The effect of γ -irradiation on the non-enzymatic browning reaction in the aqueous model solutions. *Food Chemistry*, 92(2), 357–363.

- Otoo, E. A., Ocloo, F. C. K., & Appiah, V. (2022). Effect of gamma irradiation on shelf life of smoked guinea fowl (*Numida meleagris*) meat stored at refrigeration temperature. *Radiation Physics and Chemistry*, 194, 110041.
- Pathak, B., Omre, P. K., Bisht, B., & Saini, D. (2018). Effect of thermal and non-thermal processing methods on food allergens. *Progressive Research – An International Journal*, 314–319. <https://asthafoundation.in/img/08-Beena Pathak.pdf>
- Pimenta, A. I., Guerreiro, D., Madureira, J., Margaça, F. M. A., & Cabo Verde, S. (2016). Tracking human adenovirus inactivation by gamma radiation under different environmental conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(17), 5166–5173.
- Pinto, P., Ribeiro, R., Sousa, L., Verde, S. C., Lima, M. G., Dinis, M., Santana, A., & Botelho, M. L. (2004). Sanitation of chicken eggs by ionizing radiation: functional and nutritional assessment. *Radiation Physics and Chemistry*, 71(1–2), 35–38.
- Pricaz, M., & Uță, A.-C. (2015). Gamma radiation for improvements in food industry, environmental quality and healthcare. *Rom J Biophys*, 25(2), 143–162.
- Rodríguez, J. M. Z., Domínguez, C., & Oyagüe, J. M. (2000). La oxidación de la grasa en la carne y los productos cárnicos. *Alimentación, Equipos y Tecnología*, 19(3), 67–71.
- Sabato, S. F., & Lacroix, M. (2002). Radiation effects on viscosimetry of protein based solutions. *Radiation Physics and Chemistry*, 63(3–6), 357–359. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(01\)00525-4](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(01)00525-4)
- Schuessler, H., & Schilling, K. (1984). Oxygen effect in the radiolysis of proteins: Part 2 bovine serum albumin. *International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine*, 45(3), 267–281.
- Sendra, E., Capellas, M., & Guamis, B. (2001). Alimentos irradiados. *Arbor*, 168(661), 129–153. <https://doi.org/10.3989/arbor.2001.i661.826>

- Simic, M. G. (2018). Radiation Chemistry of Water-Soluble Food Components. In *Preservation of Food by Ionizing Radiation* (pp. 1–73). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351075985-1>
- Sundararajan, S., Prudente, A., Bankston, J. D., King, J. M., Wilson, P., & Sathivel, S. (2011). Evaluation of green tea extract as a glazing material for shrimp frozen by cryogenic freezing. *Journal of Food Science*, 76(7), E511–E518.
- Syaza, S. K. F., Umar, R., Hazmin, S. N., Kamarudin, M. K. A., Hassan, A., & Juahir, H. (2017). Non-ionizing radiation as threat in daily life. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9(2S), 308–316.
- Taub, I. A., Kaprielian, R. A., & Halliday, J. W. (1978). *Radiation chemistry of high protein foods irradiated at low temperature*. IAEA. http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:09411006
- Thayer, D. W. (1993). Extending shelf life of poultry and red meat by irradiation processing. *Journal of Food Protection*, 56(10), 831–833. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-56.10.831>
- Tobback, P. P. (1977). Radiation chemistry of vitamins, ch 6. In : *Radiation Chemistry of Major Food Components*. Elsevier/North-Holland Biomedical Press. http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:08334463
- Xiao, S., Zhang, W. G., Lee, E. J., Ma, C. W., & Ahn, D. U. (2011). Effects of diet, packaging, and irradiation on protein oxidation, lipid oxidation, and color of raw broiler thigh meat during refrigerated storage. *Poultry Science*, 90(6), 1348–1357.
- Yoon, K. S. (2003). Effect of gamma irradiation on the texture and microstructure of chicken breast meat. *Meat Science*, 63(2), 273–277. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00078-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00078-5)
- Zhao, Y., Yu, H., Li, H., Qiu, Y., Xia, S., Zhang, J., & Zhu, J. (2023). Effect of E-beam irradiation on the qualitative attributes of shrimp (*Penaeus vannamei*). *Food Bioscience*, 102350.



CAPÍTULO V

Campos magnéticos

Principios y aplicaciones



CAPÍTULO V

CAMPOS MAGNÉTICOS

Objetivo

El objetivo de este capítulo es presentar los conceptos, efectos y aplicación los campos magnéticos en las matrices alimentarias.

Definición y fundamentos

Dimensión y nomenclatura

La intensidad o corriente (fuerza) de los campos magnéticos se puede medir Gauss (G) o Tesla (T).

Definición y clasificación

Cuando se produce un flujo de electricidad o un movimiento de cargas eléctricas se genera un campo de fuerza magnetizado y si este campo es capaz de inducir magnetismo a otro cuerpo se le denomina campo magnético (CM) (Khan Academy, n.d.).

En general todos los cuerpos poseen propiedades magnéticas ya que contienen cargas eléctricas en continuo movimiento (electrones que giran en su órbita). Dichas propiedades magnéticas dependen de su composición electrónica. Al someter un alimento a un campo magnético se comporta de forma única ya que su comportamiento lo determina su composición. La medida de dicho comportamiento se denomina susceptibilidad magnética (χ) y es la cuantificación de su tendencia a magnetizarse cuando se somete en un campo magnético externo. De acuerdo a lo anterior los materiales pueden clasificarse así:

Tabla 10
Clasificación de los materiales de acuerdo a sus propiedades magnéticas.

Clasificación	Susceptibilidad magnética (X)	Características	Referencia
Diamagnéticos	$X < 0$ Típicamente ~ 10-6/mol. No depende de la Temperatura	el campo magnético en su interior tiende a ser menor que externo.	(Torres, n.d.)
		Al ser sometido a un campo magnético no presentan movimientos.	
		Dispersan las líneas del campo.	
Paramagnéticos	$X > 0$ ~ 10-2 – 10-3 / mol Sensibilidad a la temperatura	El campo magnético su interior es mayor que el campo a que está sometido.	(Gili, 1993) (Neurath, 1964)
		Se desplazan a la zona en la que el campo magnético es mayor.	
		Se alinean con el campo magnético debido a que son atraídos con mayor o menor fuerza por lo tanto tienen movimientos.	
		Concentran las líneas de fuerza.	
		Cuando su susceptibilidad magnética es muy elevada se denominan ferromagnéticas.	

Fuente: Elaboración propia (2022)

Una vez definida la clasificación de los materiales de acuerdo a su susceptibilidad magnética. Se expone a continuación la clasificación de los campos magnéticos de acuerdo a su naturaleza y principios de funcionamiento. Esta última clasificación se observa en la siguiente tabla.

Tabla 11
Clasificación de los campos magnéticos de acuerdo a su naturaleza y principios de funcionamiento

Campo magnético	Tipo	Características
	Estático (CMS).	Intensidad constante.
	Oscilante (CMO).	Intensidad pulsada.
	Homogéneo.	La intensidad del campo es uniforme en el área de influencia.

	Heterogéneo.	La intensidad del campo no es uniforme con las intensidades de la corriente aplicada. La intensidad del campo es inversamente proporcional a distancia del centro de generación.
--	--------------	---

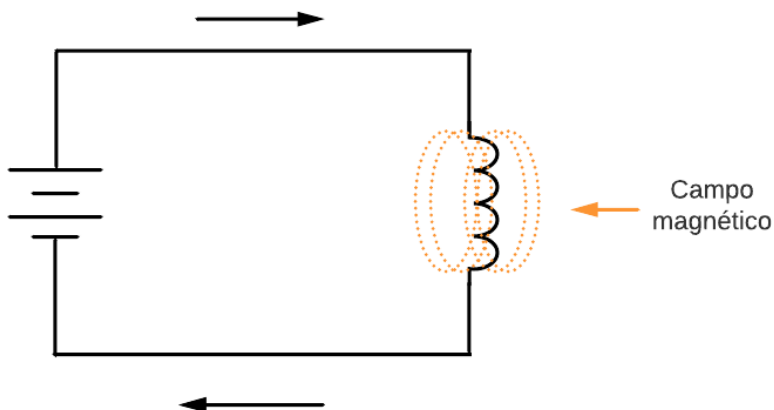
Fuente: Tomado de CEUPE (2023) y Mulay (1964)

Generación de campos magnéticos

Como ya se indicó, los campos magnéticos se producen cuando existe un flujo de electricidad en un medio transmisor y este genera un campo de fuerza magnetizado. En la siguiente figura se muestra de forma esquemática este concepto.

Figura 15

Esquema de producción de campo magnético.



Fuente: Adaptado de García (2016)

Efectos de la aplicación de campos magnéticos

La aplicación de campos magnéticos puede generar o acelerar diferentes fenómenos físicos y químicos. La siguiente tabla muestra los principales fenómenos que se han estudiado:

Tabla 12
Efectos físicos y químicos de los campos magnéticos.

Aspecto	Fenómeno	Referencias
Físico	Generación de fuerza en los componentes.	(Guru & Hizioglu, 2009) (Thidé, 2004) (Planas, 2003) (Zahn, 1979) (Liboff et al., 1984) (Heneghan et al., 2002a)
	Transferencia de energía hacia los componentes.	
	Modificaciones de la difusión rotacional de moléculas paramagnéticas (momentos magnéticos permanentes).	
	Afecta la rotación Browniana de moléculas (la difusión rotacional) por aumento de las fuerzas de London.	
	Cambio de la orientación de las biomoléculas. Cambios en la temperatura de nucleación.	
Químico	Cambios en la energía libre de activación.	(Polk & Postow, 1995) (Mulay, 1964) (Herrero & de Ávila, 2006) (Yang et al., 2020) (L. Wang et al., 2021) (Han et al., 2021) (Zhuang et al., 2018) (Yang, Wang, Huang, et al., 2021) (Sun et al., 2013) (Zou et al., 2022)
	Cambios en las constantes de velocidad específicas de las reacciones químicas.	
	Aumento del momento magnético de los electrones desapareados en los radicales libres.	
	Aumento de la reactividad química de los radicales libre.	
	Polarización.	
	Afecta los enlaces covalentes.	
	Destruye los enlaces disulfuro de las de proteína.	
	Produce cambios en la estructura secundaria.	
	Aumento de interacciones hidrofóbicas.	
	Despliegue y degradación de macromoléculas.	
	Promueve la oxidación proteica.	
	Modifica las propiedades funcionales de las proteínas.	

Fuente: Elaboración propia (2022)

Como ya se había indicado al someter un cuerpo u alimento en un campo magnético, se comporta de forma particular de acuerdo con

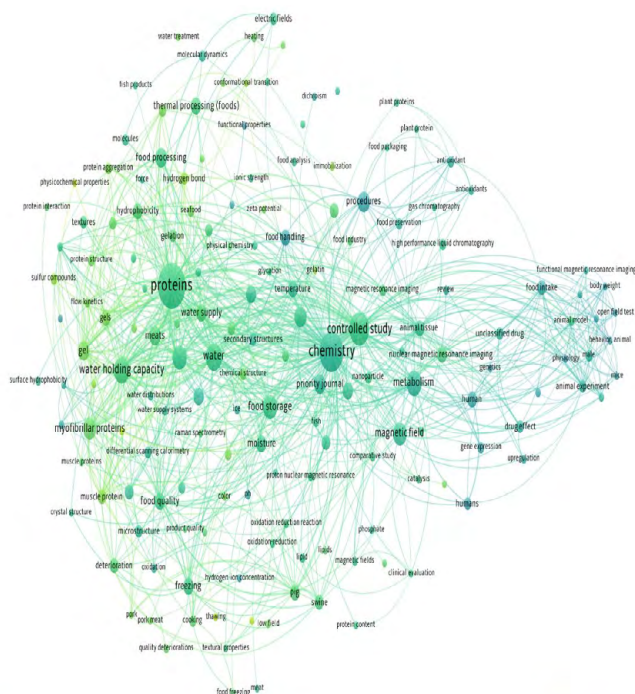
su configuración y composición interna. Es decir, un alimento puede contener tanto componentes diamagnéticos como paramagnéticos por lo tanto el comportamiento varía y no es posible generalizarlo ya que existen variables que afectan tal comportamiento (Barnothy, 2013).

Estado del arte

A continuación, se presenta el estado del arte de la producción científica sobre estudios de campos magnéticos en el mundo. Se puede observar que se estudian los campos magnéticos en diferentes aspectos y se hace mucho énfasis en el efecto en las proteínas y demás componentes alimentarios. Así mismo, se estudia lo relacionado con el metabolismo. También se puede observar que dichos estudios han sido llevados a cabo a partir del 2020 principalmente en China.

Figura 16

Resultados de estudio bibliométrico con palabras clave sobre la aplicación de campos magnéticos en matrices alimentarias.



Fuente: Elaboración propia (2022)

Resultados de estudio bibliométrico de producción bibliográfica sobre la aplicación de campos magnéticos en matrices alimentarias por países.



En general para aplicar un campo magnético es necesario tener cuenta aspectos intrínsecos y extrínsecos del alimento, tales como la resistividad eléctrica y del espesor del alimento. Además, implica el envasado del producto en plástico hermético, lo normal es realizar el tratamiento a temperatura ambiente o la temperatura que estabilice el alimento. La temperatura del alimento sube entre 2 y 5 °C y los cambios organolépticos después del tratamiento son muy pequeños (CEUPE, 2023).

120

Las propiedades magnéticas macroscópicas de los alimentos resultan de los momentos magnéticos que poseen los electrones de sus componentes. Estos electrones tienen momentos magnéticos originados por su traslación (alrededor del núcleo) y de rotación sobre su propio eje (spin) (Universidad de Vigo, 2012). La energía de las ondas electromagnéticas puede excitar dichas moléculas y la cantidad de energía inducida puede afectar el momento magnético tanto de las moléculas como de los electrones, y si la cantidad de energía es adecuada puede arrancar los electrones (potencial de ionización) de los átomos provocando ionización, la cual implica profundos cambios químicos. Por lo tanto, la ionización provocada por un agente externo produce compuestos complejos y cambios irreversibles (Mulay, 1964; Polk & Postow, 1995). Dado que los alimentos en sus biomoléculas presentan interacciones como las fuerzas electrostáticas atractivas, las interacciones de Van Der Waals, los enlaces de hidrógeno, enlaces peptídicos, enlaces covalentes, fuerzas intermoleculares e interacciones hidrofóbicas estas pueden verse afectadas por la ionización originada por el tratamiento (Chetachukwu et al., 2022) López-Pedrouso et al., 2019; Pothakamury et al., 1993).

A continuación, se presentan algunos estudios relacionados con los campos magnéticos en los alimentos.

Romero y Gélvez (2013) evaluaron el efecto de los campos magnéticos (0.1147 T/ 16 °C) durante 0, 3, 5 y 10 min sobre el pH, la estabilidad de la emulsión (EE) y la microbiota (mesófilos, coliformes totales y fecales) de emulsiones de carne de búfalo (*Bubalus bubalis*). En el pH pudieron observar que solo la muestra tratada durante 3 min fue significativamente ($P<0,05$) diferente (menor) que el de la muestra control debido a que al prevalecer la secuencia α -hélice se produce alineación de las moléculas de proteína ocasionada por la anisotropía diamagnética (Ataka et al., 1997).

En la microbiota el tratamiento produjo reducciones significativas tanto en mesófilos aerobios como en coliformes fecales y totales, siendo muy relevante el tratamiento durante 10 min; esta disminución se atribuye a la ruptura de la molécula de ADN y a la ruptura de enlaces covalentes en moléculas con dipolo magnéticos (Herrero & de Avila, 2006),

adicionalmente los campos magnéticos pueden cambiar la orientación de las biomoléculas (proteínas) y biomembranas en dirección paralela o perpendicular a la orientación del campo magnético y cambiar la tendencia iónica de la membrana plasmática alterando la velocidad de reproducción celular; de igual manera, se considera que el campo magnético perturba la unión entre el calcio y la calmodulina por la alineación del calcio a la dirección del campo y alcance de su frecuencia (Akoyunoglou, 1964; Gustavo V Barbosa-Cánovas et al., 1998; Liboff et al., 1984).

Fuentes et al. (2016) evaluaron el efecto de los campos magnéticos con una intensidad de 1,47 mT ($R=2,8 \Omega$ Ohmio) durante 0, 3, 4, y 5 min a 18°C de temperatura, sobre el pH, el perfil de textura y el color en la carne de lomo de atún (*Thunnus albacares*). Encontraron que el pH aumentó significativamente ($p<0,05$), pero este aumento no es lineal al tiempo de exposición de los tratamientos; y se atribuye al tipo de fuerza electrostática que se aplica a la muestra, teniendo en cuenta que el pH de una sustancia se debe a la concentración de iones hidronio que son de carga positiva y de poca masa atómica, es posible que se congregaran y que no estuvieran en disolución, por tanto no ejercían valores más representativos en el momento de la medida (Mulay, 1964). En la textura se observó que el tratamiento disminuyó significativamente la dureza, aumento la elasticidad, mantuvo la cohesividad y no tuvo efecto en masticabilidad en los 4 min de sometimiento. Por su parte, en el color encontraron que sus valores disminuyeron significativamente en las muestras expuestas a menos de cinco minutos.

Wu et al. (2021) estudiaron el efecto del campo magnético de corriente continua (3,8 mT) combinado con temperaturas (4 y 22 °C) sobre la capacidad de retención de agua, fuerza del gel, sulfhidrilos totales y reactivos, tamaño de partícula, enlaces químicos y estructura de un gel bajo en sal elaborado a partir de proteínas miofibrilares (carne de cerdo). Encontraron que a bajas temperaturas el tratamiento con campos magnéticos promueve la formación de agregados de moléculas de proteína y a temperatura ambiente conduce a la dispersión (Li et al., 2019).

Respecto a la fuerza del gel y la capacidad de retención de agua estas son mejoradas con el tratamiento con campo magnético debido a que por la interacción entre las moléculas se forma una estructura de red de gel más densa capaz de capturar mayor cantidad de agua (Wang et al., 2020a; Wang et al., 2020b; Wang et al., 2021; Yang et al., 2020). Por su parte, el contenido de sulfhidrilo reactivo no se vio afectado por el tratamiento, mientras que a baja temperatura si se observó aumento del grupo de sulfhidrilos totales como producto de que el tratamiento destruye los enlaces disulfuro de las moléculas de proteína (Han et al., 2021).

Por otro lado, no se verificaron cambios en la intensidad de las bandas de proteína por efecto de la acción del campo magnético al verificar el peso molecular, indicando que el entrecruzamiento entre proteínas no se resultó afectado (Wu et al., 2021). En el análisis de enlaces químicos se verificó que el tratamiento con campos magnéticos disminuyó la interacción electrostática de las moléculas de proteína por disminución del contenido de enlaces de hidrógeno lo cual indujo a cambios en la cual conformación molecular de la proteína y la estructura del gel, los enlaces disulfuro de las proteínas no se vieron afectados por dicho tratamiento, pero el contenido de enlaces disulfuro en el gel fue mayor.

En el análisis de estructura secundaria se encontró que las estructuras α -hélice y lamina β no tuvieron cambios por efecto del tratamiento. Sin embargo, se encontró que hubo transformaciones de las estructuras de giros- β en espirales aleatorias (random coil). Además, los residuos de triptófano fueron expuestos al medio polar acuoso por la acción del campo, con lo cual la intensidad normalizada se redujo. De igual manera, se observaron cambios en el entorno de los anillos alifáticos aumentando la capacidad de producir más interacciones hidrofóbicas (Zhuang et al., 2018). Por el contrario, el campo magnético no produjo cambios en la intensidad de los residuos de tirosina.

El análisis de la estructura, por microscopios electrónica de barrido, indicó que el tratamiento con campos magnéticos produce en el gel una estructura filamentosa, con tamaño de poro uniforme, que pueden contener más moléculas de agua por lo tanto aumenta su capacidad de

retención de agua ya que retiene las moléculas con mayor firmeza (Yang et al., 2020).

Yang et al. (2022) investigaron la capacidad de retención de agua, perfil de textura, estructura molecular, composición química y microestructura de geles de proteína miofibrilar (extraída de tejidos de cerdo) pretratada durante 3 horas con campo magnético (corriente continua 9.5 mT) y adicionados de pirofosfato tetrasódico (0–5 g/L). Encontraron que el tratamiento con campos magnéticos aumentó la capacidad de retención de agua debido a que el tratamiento produjo la expansión de la estructura proteica e indujo al entrecruzamiento de residuos formando estabilizando la estructura de la red (Wang et al., 2020; Yang et al., 2021). En la textura la dureza y la fuerza de fractura fueron más bajas debido a que bajo el tratamiento con campos se expusieron más residuos internos los cuales participaron en la reticulación formando una red de gel con mayor capacidad de retener agua (Guo et al., 2019; Wang et al., 2020). Por su parte, el estudio reológico demostró que por efecto del tratamiento los geles formados tienen una viscosidad aparente más baja, lo cual es atribuido a los cambios estructurales causados por campo magnético en la proteína tales como despliegue y degradación de macromoléculas (Yang, et al., 2021).

En el estudio del efecto del tratamiento en la estructura proteica, se observó que después de este, tanto las estructuras hélice α como los espirales al azar incrementaron significativamente, mientras que las láminas β y los giros β disminuyeron debido a que tratamiento induce la ruptura de las interacciones hidrofóbicas y el desarrollo de la estructura del gel; a la reorganización y el entrecruzamiento de los residuos cargados que obligaron a la proteína a alinearse en la dirección del campo magnético e indujeron la disposición de toda la proteína (L. Wang et al., 2020) Yang, Wang, Guo, et al., 2021). Además, determinaron que el tratamiento produce aumento de los residuos alifáticos, residuos de tirosina y triptófano debido a que los residuos expuestos tenderían a volver a entrecruzarse y reorganizarse ordenadamente (Yang, Wang, Guo, et al., 2021).

Jiang et al. (2023) evaluaron el efecto de aplicación de campo magnético estático (10 mT,) en los parámetros de congelación, distribución del agua, perfil de textura y resistencia, grupos funcionales presentes, formación de cristales, microestructura en la congelación (-20°C) de geles de gelatina. En los parámetros de congelación encontraron que el tratamiento redujo la nucleación en 0,32 °C debido que dicha nucleación del hielo es un proceso estocástico y el campo magnético actúa sobre las moléculas de agua, las cuales se encuentran en su estado natural aleatorio y bajo la acción de este los espines electrónicos de las moléculas diamagnéticas se unifican potenciando el efecto de vibración térmica de los espines electrónicos reduciendo la temperatura de nucleación (Heneghan et al., 2002; Sutariya & Sunkesula, 2021). Sin embargo, el tratamiento no tuvo efecto en el tiempo de transición de fase, el estado de unión del agua, en los parámetros de textura del gel y los componentes estructurales secundarios de la proteína, pero si redujeron los cambios que la congelación produce en la estructura terciaria; el tratamiento redujo en 19,80 % el área de los cristales de hielo debido a la reducción de la velocidad de congelación que da como resultado la formación de cristales de hielo más pequeños y uniformes (Sutariya & Sunkesula, 2021).

Liu et al. (2023) determinaron los cambios en las propiedades físico-químicas (sulfhidrilos libres, disulfuros, actividad antioxidante, estructura, propiedades emulsificantes, tamaño de partícula, potencial Z, propiedades espumantes y capacidad de retención de agua) de la proteína de suero por efecto del tratamiento con campos magnéticos (5, 10, 15 y 20 T). Encontraron que el tratamiento no indujo a la introducción de grupos funcionales diferentes a carbono (C 1s), nitrógeno (N 1s) y oxígeno (O 1s). Sin embargo, el contenido de oxígeno aumentó y el nitrógeno disminuyó indicando cambios conformaciones de N-C O en HO-C O (Bu et al., 2019). En cuanto al contenido de grupos sulfhidrilo libre de la proteína, estos disminuyeron, mientras el contenido de enlaces disulfuro aumentó como consecuencia de la oxidación de la proteína por el tratamiento, ya que una vez desdoblada la β -lactoglobulina sus grupos sulfhidrilo activos reaccionaron con otros grupos sulfhidrilo de la cisteína aumentando los enlaces disulfuro, de igual manera, la α -lactoalbúmina se polimerizó con grupos SH libres formando complejos proteicos y reduciendo dichos

grupos sulfhidrilo libres (Sun et al., 2013). Por su parte, la actividad antioxidante de la proteína de suero mejoró significativamente con el tratamiento, lo inmediatamente anterior debido a que con el despliegue parcial de la β -lactoglobulina, se expusieron algunos aminoácidos reactivos (Cys, Glu) que originalmente estaban ubicados en el interior de la proteína y quedaron expuestos, los cuales reaccionaron con los radicales ABTS y DPPH (Rumyantsev et al., 2012).

En cuanto a los resultados de cristalinidad revelaron que esta incrementa debido a que el tratamiento disminuye el espaciado de red y produce mayor empaquetado de la proteína indicando que las moléculas estarían alineadas en la dirección del campo (Pankaj et al., 2014; Yin, 2015). En este mismo aspecto, se observó disminución significativa ($p < 0,05$) en la hélice α y aumento significativo ($p < 0,05$) en la hoja β de la estructura secundaria por exposición de los residuos de triptófano a la superficie de la α -lactoalbúmina por efecto del tratamiento el cual, además, dio mayor estabilidad a la molécula (Liu et al., 2022). Por su parte, el índice de actividad de emulsión y el índice de estabilidad de la emulsión fueron mayores en las muestras sometidas a campos magnéticos debido a que dichos campos aumentan la hidrofobicidad en la superficie de la proteína por exposición de los grupos hidrofóbicos con el consecuente aumento de capacidad de unión de la grasa. Además, el tratamiento alteró la estructura conformacional (aumento de la hoja β) aumentando la adsorción de la proteína en la interfaz aceite-agua y produjo la conformación de polímeros formando una capa interfacial gruesa, que a su vez estabilizan la emulsión (Zou et al., 2022). En lo relacionado con el tamaño de las partículas observaron que este fue significativamente mayor ($p < 0,05$) y se produjo porque el tratamiento promueve la formación de enlaces covalentes desencadenando la formación de polímeros grandes mediante interacciones hidrofóbicas y enlaces disulfuro (Wang et al., 2020). Otro aspecto estudiado fue la carga efectiva (potencial Zeta) el cual aumentó significativamente ($p < 0,05$), lo cual fue atribuido a que los grupos cargados negativamente quedaron expuestos a la superficie después de la afectación a las interacciones intramoleculares y el despliegue de estructura proteica (Zhao & Xiao, 2017).

En este mismo sentido, el tratamiento aumentó la capacidad espumante y la estabilidad de la espuma dado el despliegue y la exposición de los grupos hidrófobos por efecto del tratamiento, lo que mejoró la actividad de la superficie en la interfaz solución-aire facilitando la formación de espuma; de igual manera, combinación de morfología esponjosa porosa y estructuras laminares proporciona mayor flexibilidad molecular lo cual conduce a una más rápida adsorción en la interfaz aire-agua mejorando la capacidad de formación de espuma (Gharbi & Labbafi, 2019). Otra propiedad funcional que también presentó mejora fue la capacidad emulsificante, la cual aumentó significativamente en los tratamientos con 10T debido a que por efecto del tratamiento se exponen los enlaces hidrofóbicos y enlaces disulfuro promoviendo la formación de redes tridimensionales (Liu et al., 2023).

Liu et al. (2023) evaluaron el efecto del pretratamiento con campos magnéticos de corriente continua de 3 mT, durante 15 min y la velocidad de agitación de 250 rpm sobre el color, pérdidas por cocción, fuerza de corte y perfil de textura, propiedades reológicas dinámicas, distribución de la humedad y estructura de pasta de pollo. Pudieron determinar en el color, bajo las condiciones de tratamiento, los valores de L^* y a^* disminuyeron significativamente ($P < 0,05$) lo cual fue atribuido a que los campos magnéticos de baja frecuencia provocan desintegración de los grupos macromoleculares de mioglobina aumentando los grupos activos expuestos e inhibiendo su oxidación y disminuyendo la cantidad de MetMb con lo cual se reduce el enrojecimiento.

Además, el tratamiento mejora la estabilidad oxidativa de la mioglobina por distribución uniforme de las partículas y aumento de la carga superficial (Xia et al., 2020). También observaron que las pérdidas por cocción disminuyeron demostrando mayor capacidad de retención y captura de agua, lo cual fue atribuido a que el tratamiento con campos magnéticos modifica la constante dieléctrica y la conductividad del agua, altera la distribución de moléculas y electrones, y afecta la hidratación de las proteínas produciendo mayor retención en la red (Pang & Bo, 2008).

En cuanto a la textura observaron que la dureza, masticabilidad y ternura fueron significativamente ($P < 0,05$) menores debido a que según X.

Wang et al. (2020a) el tratamiento con campos magnéticos reduce el contenido de estructura α hélice y aumenta el contenido de estructuras de hoja β y giro β , es decir los campos magnéticos modifican la estructura de la proteína y mejoran la hidratación disminuyendo la dureza de los productos cárnicos emulsionados. Además, indicaron que por efecto del tratamiento con campos magnéticos se formaron estructuras estables ya que este promueve interacciones más estrechas entre macromolécula (Liu et al., 2023).

De igual manera, los campos magnéticos inducen la exposición, en la superficie de la proteína, de residuos alifáticos hidrofóbicos y el aumento de la interacción hidrofóbica convierte las agregaciones de proteínas en macromoléculas con alto contenido de agua (Yang, et al., 2021b); en este mismo sentido la aplicación de campos magnéticos induce la aceleración de las moléculas de proteína cargadas a reorganizarse ordenadamente y a las colas de miosina a expandirse por adelantado mejorando el grado de enlaces cruzados entre proteína-agua y proteína-proteína, por lo tanto se aumenta el porcentaje de agua inmovilizada (Yang et al., 2020).

De igual manera, este último comportamiento se atribuye a que los campos magnéticos aumentan la interacción hidrofóbica, el entrecruzamiento de proteínas, estabilizan el movimiento del agua, las proteínas y los glóbulos de grasa e inducen el equilibrio de la estructura del gel tratado (Guo et al., 2019; Liu et al., 2023).

Bibliografía

Akoyunoglou, G. (1964). Effect of a magnetic field on carboxydismutase. *Nature*, 202, 452–454.

Ataka, M., Katoh, E., & Wakayama, N. I. (1997). Magnetic orientation as a tool to study the initial stage of crystallization of lysozyme. *Journal of Crystal Growth*, 173(3–4), 592–596.

Barbosa-Cánovas, G V, Gongora-Nieto, M. M., & Swanson, B. G. (1998). Nonthermal electrical methods in food preservation/Métodos eléctricos no térmicos para la conservación de alimentos. *Food Science and Technology International*, 4(5), 363–370.

Barbosa-Cánovas, Gustavo V, Palou, E., Pothakamury, U., & Swanson, B. (1998). *Conservación no térmica de alimentos*. Acribia,.

Barnothy, M. F. (2013). *Biological effects of magnetic fields*. Springer.

Bu, X., Chen, F., Chen, W., & Ding, Y. (2019). The effect of whey protein on the surface property of the copper-activated marmatite in xanthate flotation system. *Applied Surface Science*, 479, 303–310.

CEUPE. (2023). *Tratamiento no térmicos en la industria alimentaria*. <https://Www.Ceupe.Com/Blog/Tratamientos-No-Termicos-En-La-Industria-Alimentaria.Html>. <https://www.ceupe.com/blog/tratamientos-no-termicos-en-la-industria-alimentaria.html>

Chacana, M., & Cortés, P. (2008). Campos magnéticos oscilantes en el procesado de alimentos. *Universidad de La Serena. Facultad de Ingeniería, Departamento de Alimentos. Disponible En: Www. e-Alimentos. Cl*.

Chetachukwu, S. A., Tahergorabi, R., & Hosseini, S. V. (2022). Proteins, Peptides, and Amino Acids. In *Nutraceutical and Functional Food Components* (pp. 19–48). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85052-0.00014-3>

Fuentes, L., Acevedo, D., & Gélvez, V. M. (2016). Efecto del ultrasonido y campos magnéticos en la carne de lomo atún (*Thunnus albacares*). *Informacion Tecnologica*, 27(2), 21–30. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000200004>

Gharbi, N., & Labbafi, M. (2019). Influence of treatment-induced modification of egg white proteins on foaming properties. *Food Hydrocolloids*, 90, 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.11.060>

Gili, J. (1993). Introducción biofísica a la resonancia magnética. *Centre Diagnòstic Pedralbes*, 5.

Guo, J., Zhou, Y., Yang, K., Yin, X., Ma, J., Li, Z., Sun, W., & Han, M. (2019). Effect of low-frequency magnetic field on the gel properties of pork myofibrillar proteins. *Food Chemistry*, 274, 775–781.

Guru, B. S., & Hiziroglu, H. R. (2009). *Electromagnetic field theory fundamentals*. Cambridge university press.

Han, Z., Cai, M., Cheng, J., & Sun, D.-W. (2021). Effects of constant power microwave on the adsorption behaviour of myofibril protein to aldehyde flavour compounds. *Food Chemistry*, 336, 127728.

Heneghan, A. F., Wilson, P. W., & Haymet, A. D. J. (2002a). Heterogeneous nucleation of supercooled water, and the effect of an added catalyst. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(15), 9631–9634.

Heneghan, A. F., Wilson, P. W., & Haymet, A. D. J. (2002b). Heterogeneous nucleation of supercooled water, and the effect of an added catalyst. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(15), 9631–9634. <https://doi.org/10.1073/pnas.152253399>

Herrero, A. M., & de Avila, M. D. H. (2006). Innovaciones en el procesado de alimentos: Tecnologías no térmicas. *Revista de Medicina de La Universidad de Navarra*, 71–74.

Jiang, Q., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Chen, B. (2023). Effects of electric and magnetic field on freezing characteristics of gel model food. *Food Research International*, 112566.

Khan Academy. (n.d.). *¿Qué son los campos magnéticos? (artículo) | Khan Academy*. Retrieved December 4, 2022, from <https://es.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnetic-field-current-carrying-wire/a/what-are-magnetic-fields>

Li, F., Wang, B., Liu, Q., Chen, Q., Zhang, H., Xia, X., & Kong, B. (2019). Changes in myofibrillar protein gel quality of porcine longissimus muscle induced by its structural modification under different thawing methods. *Meat Science*, 147, 108–115.

Liboff, A. R., Williams, T., Strong, D. M., & Wistar, R. (1984). Time-varying magnetic fields: effect on DNA synthesis. *Science*, 223(4638), 818–820.

Liu, P., Hou, M., Yue, Y., Tong, Y., Zhang, T., Lu, Z., & Yang, L. (2023). Effects of ultrahigh magnetic field on the structure and properties of whey protein. *LWT*, 114590. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2023.114590>

Liu, Q., Sun, Y., Cheng, J., Zhang, X., & Guo, M. (2022). Changes in conformation and functionality of whey proteins induced by the interactions with soy isoflavones. *LWT*, 163, 113555. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113555>

Liu, S., Wang, Z., Zheng, J., Sun, W., Xiao, Z., & Shao, J. H. (2023). Effects of direct current magnetic field co-treated with stirring on gel properties of chicken batter: Hydration and textural properties. *Journal of Food Engineering*, 339, 111279. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111279>

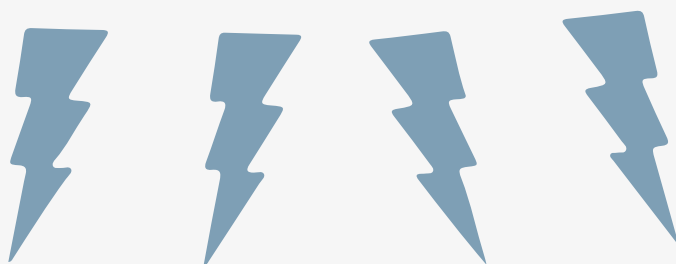
López-Pedrouso, M., Lorenzo, J. M., Zapata, C., & Franco, D. (2019). Proteins and amino acids. In *Innovative Thermal and Non-Thermal Processing, Bioaccessibility and Bioavailability of Nutrients and Bioactive Compounds* (pp. 139–169). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814174-8.00005-6>

Mulay, L. N. (1964). Basic concepts related to magnetic fields and magnetic susceptibility. *Biological Effects of Magnetic Fields*, 33–55.

- Neurath, P. W. (1964). Simple Theoretical Models for Magnetic Interactions with Biological Units. In *Biological Effects of Magnetic Fields* (pp. 25–32). Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-6578-3_2
- Pang, X. F., & Bo, D. (2008). The changes of macroscopic features and microscopic structures of water under influence of magnetic field. *Physica B: Condensed Matter*, 403(19–20), 3571–3577. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2008.05.032>
- Pankaj, S. K., Bueno-Ferrer, C., Misra, N. N., Bourke, P., & Cullen, P. J. (2014). Zein film: Effects of dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(18).
- Planas, J. G. (2003). Introducción Biofísica a la Resonancia Magnética en Neuroimagen. V:03-2, V:03-2.
- Polk, C., & Postow, E. (1995). *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields, -2 Volume Set*. CRC press.
- Pothakamury, U. R., Barletta, B. J., Barbosa Canovas, G. V., & Swanson, B. G. (1993). Inactivación de microorganismos en alimentos usando campos magnéticos oscilantes. *Revista Española de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 33(5), 479–489.
- Romero Barragán, P. E., & Gélvez Ordóñez, V. M. (2013). Efecto de los campos magnéticos y el ultrasonido sobre la calidad microbiológica y las propiedades funcionales en una emulsión de carne de búfalo (*Bubalus bubalis*). *Bistua: Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 11(1).
- Rumyantsev, M. S., Gushchin, A. V., & Zelentsov, S. V. (2012). Effect of the type of hydrogen bonding on the reactivity of hydroxyl groups in the acetalization of poly (vinyl alcohol) with butanal. *Polymer Science Series B*, 54(9–10), 464–471.
- Sun, W., Zhou, F., Sun, D.-W., & Zhao, M. (2013). Effect of oxidation on the emulsifying properties of myofibrillar proteins. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 1703–1712.

- Sutariya, S. G., & Sunkesula, V. (2021). *Food freezing: emerging techniques for improving quality and process efficiency a comprehensive review*.
- Thidé, B. (2004). *Electromagnetic field theory*. Upsilon books Uppsala.
- Torres, J. (n.d.). *Fenómenos magnéticos I*.
- Universidad de Vigo. (2012). *Magnetismo*. http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/magnetismo_definiciones.htm
- Wang, C., Wang, J., Zhu, D., Hu, S., Kang, Z., & Ma, H. (2020). Effect of dynamic ultra-high pressure homogenization on the structure and functional properties of whey protein. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 1301–1309.
- Wang, L., Wang, X., Ma, J., Yang, K., Feng, X., You, X., Wang, S., Zhang, Y., Xiong, G., & Wang, L. (2021). Effects of radio frequency heating on water distribution and structural properties of grass carp myofibrillar protein gel. *Food Chemistry*, 343, 128557.
- Wang, L., Xia, M., Zhou, Y., Wang, X., Ma, J., Xiong, G., Wang, L., Wang, S., & Sun, W. (2020). Gel properties of grass carp myofibrillar protein modified by low-frequency magnetic field during two-stage water bath heating. *Food Hydrocolloids*, 107, 105920.
- Wang, X., Xia, M., Zhou, Y., Wang, L., Feng, X., Yang, K., Ma, J., Li, Z., Wang, L., & Sun, W. (2020). Gel properties of myofibrillar proteins heated at different heating rates under a low-frequency magnetic field. *Food Chemistry*, 321, 126728.
- Wu, D., Guo, J., Wang, X., Yang, K., Wang, L., Ma, J., Zhou, Y., & Sun, W. (2021). The direct current magnetic field improved the water retention of low-salt myofibrillar protein gel under low temperature condition. *LWT*, 151, 112034. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112034>
- Xia, M., Chen, Y., Ma, J., Yin, X., Wang, L., Wu, W., Xiong, G., Sun, W., & Zhou, Y. (2020). Effects of low frequency magnetic field on myoglobin oxidation stability. *Food Chemistry*, 309, 125651.

- Yang, K., Wang, H., Huang, J., Wu, D., Zhao, M., Ma, J., & Sun, W. (2021). Effects of direct current magnetic field treatment time on the properties of pork myofibrillar protein. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(2), 733–741.
- Yang, K., Wang, L., Guo, J., Wu, D., Wang, X., Wu, M., Feng, X., Ma, J., Zhang, Y., & Sun, W. (2021). Structural changes induced by direct current magnetic field improve water holding capacity of pork myofibrillar protein gels. *Food Chemistry*, 345, 128849.
- Yang, K., Wu, D., Wang, L., Wang, X., Ma, J., & Sun, W. (2022). Direct current magnetic field: An optional strategy for reducing pyrophosphate in gelatinous meat products. *LWT*, 169, 114018. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114018>
- Yang, K., Zhou, Y., Guo, J., Feng, X., Wang, X., Wang, L., Ma, J., & Sun, W. (2020). Low frequency magnetic field plus high pH promote the quality of pork myofibrillar protein gel: A novel study combined with low field NMR and Raman spectroscopy. *Food Chemistry*, 326, 126896.
- Yin, D. C. (2015). Protein crystallization in a magnetic field. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 61(1), 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2015.03.001>
- Zahn, M. (1979). *Electromagnetic Field Theory: a problem solving approach*. Wiley.
- Zhao, Z., & Xiao, Q. (2017). Effect of chitosan on the heat stability of whey protein solution as a function of pH. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(5), 1576–1581.
- Zhuang, X., Han, M., Bai, Y., Liu, Y., Xing, L., Xu, X., & Zhou, G. (2018). Insight into the mechanism of myofibrillar protein gel improved by insoluble dietary fiber. *Food Hydrocolloids*, 74, 219–226.
- Zou, X.-L., Kang, Z.-L., Li, Y., & Ma, H.-J. (2022). Effect of sodium bicarbonate on solubility, conformation and emulsion properties of pale, soft and exudative meat myofibrillar proteins. *LWT*, 157, 113097.



CAPÍTULO VI

Plasma frío

Principios y aplicaciones



CAPÍTULO VI

PLASMA FRÍO

Objetivo

El objetivo de esta unidad es presentar los conceptos, efectos y aplicación del plasma frío no térmico en las matrices alimentarias.

Definición y fundamentos

Dimensión y nomenclatura

El plasma se considera como el cuarto estado de agregación de la materia. Se produce al ionizar total o parcialmente un gas, utilizando cualquier fuente de energía para su generación (Fitzpatrick, 2014). Los electrones libres toman energía del campo eléctrico aplicado y la pierden en procesos de excitación e ionización de los átomos y moléculas del gas. La luz emitida por un plasma, su espectro de emisión característico, viene determinada por el tipo de átomos, moléculas e iones que forman (Gordillo Vasquez, 2008). El plasma cumple las leyes de los gases, y en muchos sentidos se comporta como un gas (González Elipe et al., 2013).

La generación del plasma lleva consigo ciertos fenómenos los cuales dependen de la intensidad del campo energético aplicado, las condiciones en las que se lleva a cabo esta generación, la densidad de partículas del gas sobre el cual se trabaja (Baeza Oliete & Jesús Verdú Martín Valencia, 2017).

Dentro de las variables que se manejan en la generación del plasma tenemos:

Temperatura. En la física del plasma se mide la temperatura como unidades energéticas (Electrón-voltio). Para el plasma caliente se utiliza

el Kev. En un plasma puede existir durante largo tiempo un estado caracterizado por dos temperaturas: la electrónica, T_e y la iónica T_i .

La interacción electrostática. Corresponde a cantidad de energía de atracción o repulsión de las partículas que componen el plasma.

Degeneración. Este aspecto es considerado como el hecho de que un mismo nivel de energía posea diferentes estados físicos con propiedades similares.

Densidad electrónica. Varía entre uno y 10^{25} electrones por centímetro cúbico y depende en especial de la composición del gas que se ionice.

Presión. La presión del plasma se halla por la correlación entre la temperatura y la densidad de electrones (n_e) y iones (n_i). Así:

$$p = 1.6 \times 10^{-12}(n_e + n_i) T. \quad (\text{Ecuación 2})$$

Todos los parámetros resultan importantes y la magnitud de cada uno de ellos y la relación con los otros determina un tipo de plasma.

Definición y clasificación

Definición

Un plasma es un gas muy ionizado con igual número de cargas eléctricas positivas y negativas. En orden creciente de distribución de energía interna (o temperatura) de las partículas que componen el sistema, los plasmas constituyen el cuarto estado de agregación de la materia, tras sólidos, líquidos y gases. Así, el estado de plasma se alcanza cuando buena parte de las partículas que lo componen alcanzan tanta energía como para que sea posible su ionización liberando electrones. Precisamente porque tienen cargas eléctricas libres, los plasmas son buenos conductores eléctricos, a diferencia de los gases (González Elipe et al., 2013; Fitzpatrick, 2014).

El plasma consiste en un gas ionizado, casi neutro, que contiene especies reactivas como electrones, iones positivos y negativos, radicales libres,

átomos de gas, moléculas en el estado fundamental o excitado, y cuantos de radiación electromagnética (fotones) (Coutinho et al., 2018).

Clasificación

El plasma puede ser clasificado como plasma de alta temperatura y plasma de baja temperatura los cuales dependen del tipo y la cantidad de energía aplicada en el plasma.

En la siguiente tabla se presenta la clasificación del plasma.

Tabla 13
Clasificación de plasma

Tipos de plasma		Características		Generados por:
Plasma de alta temperatura	Plasma caliente o térmico de fusión.	-Presentan equilibrio termodinámico. -Temperatura en su interior entre 10^7 - 10^9 °C.		-Interiores estelares. -Fusión nuclear.
	Plasma caliente o térmico.	-Presentan equilibrio termodinámico. -Generados a presiones >133 mbar. -Temperaturas en su interior entre 10^4 - 10^5 °C.		Descargas de alta intensidad.
Baja temperatura	Quaisi-equilibrio.	Presión del gas es baja o la tensión eléctrica aplicada en la descarga es alta. Los electrones, iones y partículas neutras tienen diferentes "temperaturas" o energías cinéticas medias.		Sistemas de corriente continua, radiofrecuencia, microondas o en descargas pulsadas.
	Plasma frío.	Sin equilibrio termodinámico. Presiones < 133 mbar. Temperatura de las partículas neutras y iones es cercana a la temperatura ambiente (25-10 °C). La temperatura electrónica entre 5000 y 105 °C. Se producen a baja presión ($p < 133$ mbar).	A baja presión	Sistemas de corriente continua, radiofrecuencia, microondas o en descargas pulsadas a una presión de vacío de 10-2 a 10-4 kPa (10-1 a 10-3 mbar) (Tendero et al., 2006).
			A presión atmosférica.	Pulsos de entre 10-6 s y 10-9 s.

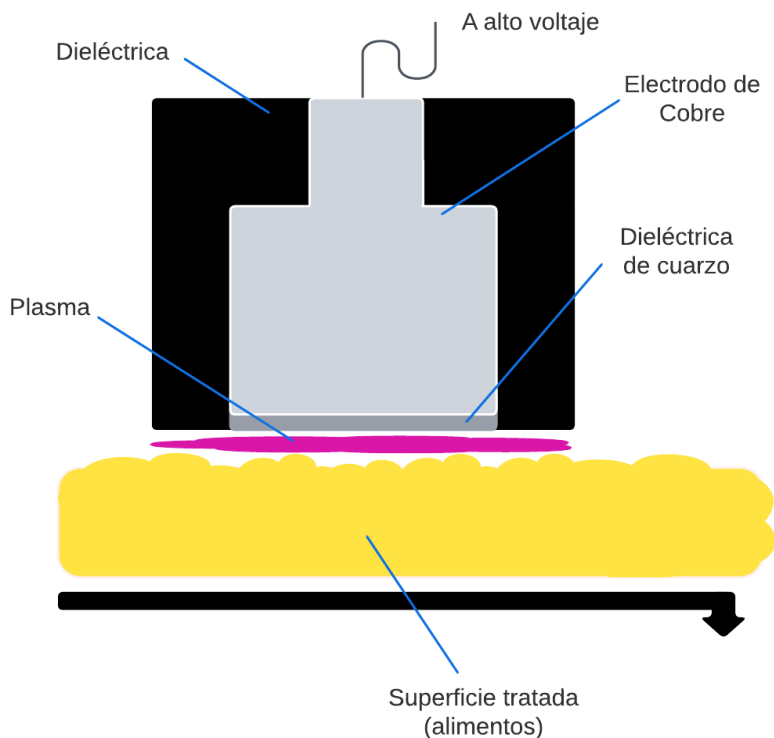
Fuente: Tomado de Baeza & Valencia (2017); Coutinho et al., (2018) y Tendero et al., (2006)

Generación de plasma frío

En este texto solo se tendrá en cuenta el plasma frío, ya que es el que se estudia en las matrices alimentarias.

De acuerdo a la clasificación dada en la Tabla 6.1 el plasma frío se produce por la aplicación de energía (térmica, eléctrica, o electromagnético) a un gas para reorganizar la estructura electrónica de las especies (átomos, moléculas) y generar especies excitadas e iones. A continuación, se presenta un esquema de la producción plasma frío (Coutinho et al., 2018).

Figura 18
Esquema de la producción de plasma frío.



Fuente: Adaptado de Dirks et al. (2012)

Como se indicó anteriormente, el plasma frío se puede subdividir en plasma generado a presión atmosférica o a baja presión o presión

de vacío. En el plasma frío la temperatura permanece baja, lo cual permite utilizarlo en tejidos biológicos y en productos sensibles a altas temperaturas (Baeza & Valencia, 2017; Ganesan et al., 2021).

El plasma generado a baja presión o presión de vacío la densidad de partículas activadas es baja, se producen en reactores que resultan costosos a la hora de garantizar la baja presión (Tendero et al., 2006).

A manera de ejemplo, al someter entre dos electrodos (separados un cm) el aire a una descarga de 30 Kv por cm. Se produce plasma a presión atmosférica y el fenómeno que ocurre podría analizarse de la siguiente manera: Se produce una chispa luminiscente que conecta los dos electrodos. Este proceso se da porque al aplicar el voltaje la energía suministrada este es capaz de arrancar los electrones de los componentes del gas (átomos y moléculas) y estos se ionizan convirtiendo el aire en un material conductor.

De esta manera, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos cuando se produce plasma a presión atmosférica: Distancia entre electrodos, presión, voltaje aplicado, tipo de energía, composición de los gases y tipo de electrodos (Laroque et al., 2022; Nehra et al., 2008).

Otro aspecto importante es que el plasma frío producido a presión atmosférica puede ser clasificado de acuerdo a su método de generación: Descargas de barrera dieléctrica (DBD), descarga de corona, los chorros de plasma a presión atmosférica (APPJ) y las descargas de arco deslizante (Corradini, 2019; Jiang et al., 2020; Turner, 2016).

Efectos de la aplicación de plasma frío en alimentos

Al aplicar un campo eléctrico a un gas, este campo imprime fuerza y aceleración a sus electrones libres y se producen colisiones con los demás átomos y moléculas neutras que lo componen. De esta manera, se generan electrones por ionización y especies reactivas (moléculas y átomos del gas en estado excitado (Young & St. John, 1969) iones positivos y negativos y radicales libres (Graves, 2012; Schröter et al., 2018). Dichas especies reactivas, de igual manera, colisionarán secundariamente y darán lugar a

nuevas especies y reacciones. Según Ekezie et al. (2019) la composición química del gas que se utiliza en el tratamiento con plasma y la acción individual y/o sinérgica de las especies reactivas formadas determinan la naturaleza de las reacciones que ocurren durante el tratamiento de cada producto o matriz alimentaria.

En la siguiente Tabla se muestran las principales reacciones y efectos de la aplicación de plasma frío.

Tabla 14
Efectos de la aplicación de plasma frío

Aspecto		Fenómeno	Efecto	Referencias
Físico		Fuerza.	Colisiones.	(Locke et al., 2012)
		Aceleración		
		Calor localizado	Deterioro de las características funcionales y nutricionales.	(Niemira, 2014)
Químico	Reacciones primarias	Formación de iones	Positivo y negativos.	
		Formación de radicales libres	Hidroxilos (OH $\cdot$). Monóxido de N (NO $\cdot$) Dióxido de (NO $_2\cdot$). Superóxido (O $_2\cdot$) Oxígeno atómico singlete (O(1 D), O(1 S)). Oxígeno molecular singlete ($^1\Delta_g$, $^1\Sigma_g^-$), Nitrógeno atómico excitado y el Nitrógeno molecular excitado $N_2(A^3\Sigma\mu^+)$	(Locke et al., 2012) (Xu et al., 2016) (Surowsky et al., 2016) (Niemira, 2014)
	Reacciones secundarias	Formación de moléculas más estables	Peróxido de hidrógeno (H $_2$ O $_2$). Nitritos (NO $_2^-$). Nitratos (NO $_3^-$). Ozono (O $_3$).	(Møller et al., 2007) (Baeza Oliete & Jesús Verdú Martín Valencia, 2017)
	Efectos en moléculas	Proteínas	Aumento de enlaces disulfuro. Disminución de las hojas β . un Aumento de las estructuras de hélice α y giro β . Fragmentación. Formación de enlaces cruzados. Desdoblamiento. Cambios conformacionales.	(Segat et al., 2015) (Misra, 2016)

Aspecto		Fenómeno	Efecto	Referencias
		Lípidos	Formación de: Aldehídos saturados. Ácidos carboxílicos. Ozónido. Peróxidos o compuestos cíclicos de trioxolano. Aumento de ácidos grasos de cadena corta. Aumento en el contenido de ácidos grasos libres. Aumento en el contenido de fosfolípidos. Aumento de marcadores de oxidación (hidroperóxido y n-hexanal).	(Surowsky et al., 2016) (Sarangapani et al., 2017) (Sega et al., 2010)
		Carbohidratos	Produce: Despolimerización. Reticulación. Formación de grupos funcionales. Cambio de la naturaleza hidrofílica. Degradación. Fragmentación. Cambios en la morfología. Cambios en la estructura. Cambios en la digestibilidad. Cambios en la cristalinidad	(Thirumdas et al., 2017) (S. Gao et al., 2019) (Khorram et al., 2015) (Okyere et al., 2019)

Fuente: Elaboración propia (2022)

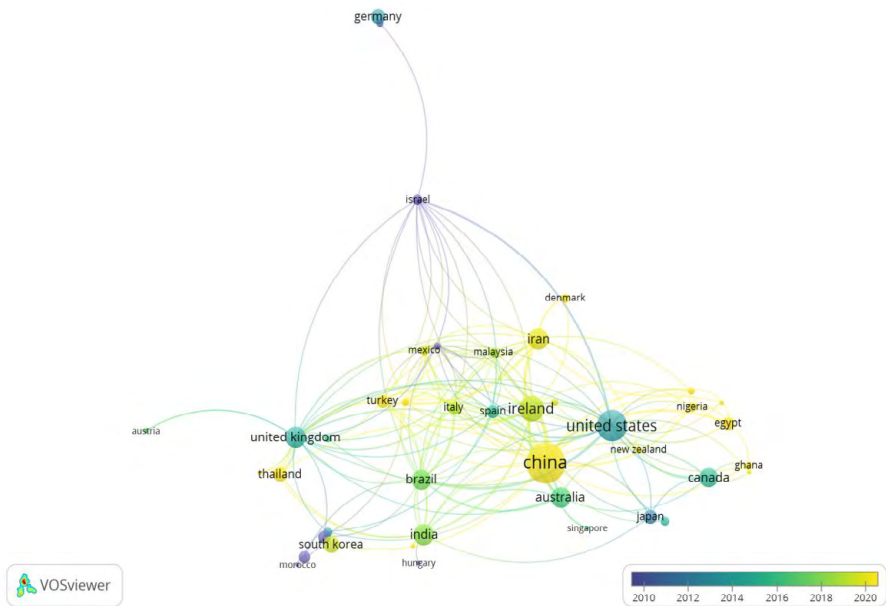
En el tratamiento de alimentos las especies reactivas pueden interactuar con los componentes alimentarios y su efecto resulta particular para cada alimento dada su composición, por lo que se hace necesario estudiar de forma individual el efecto del tratamiento de acuerdo a la matriz sometida al tratamiento con plasma.

Estado del arte

En las siguientes gráficas se pueden apreciar las investigaciones recientes de plasma frío en alimentos. Estos estudios bibliométricos, realizados

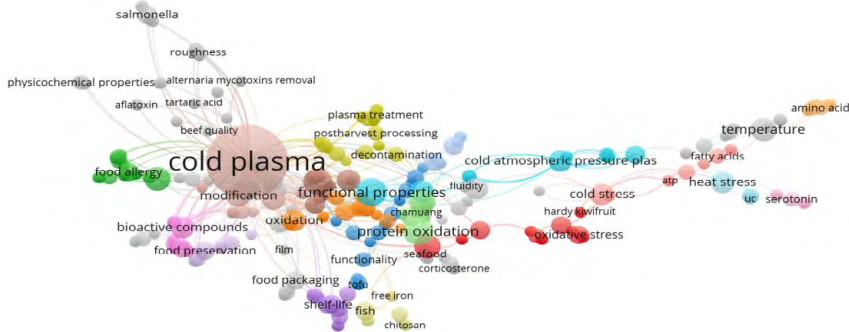
por palabras clave de autores, revelan que existen interés por evaluar el efecto del tratamiento en los componentes alimentario y que dichos estudios se han realizado principalmente en China, Estados Unidos e Irlanda.

Figura 19
Resultados de estudios bibliométricos por palabras clave sobre estudios de plasma frío.



Fuente: Elaboración propia (2022)

Figura 20
Resultados de estudios bibliométricos por país que investiga sobre plasma frío.



Fuente: Elaboración propia (2022)

Efectos en las matrices alimentarias

Los productos alimenticios son matrices multicomponentes y cada componente tiene diferentes comportamientos según su naturaleza, concentración, factores externos o ambiente en el que se encuentre lo cual puede afectar la eficiencia del método o tratamiento al cual es sometido y la calidad final del alimento. Por ejemplo, en alimentos líquidos, el plasma penetra con mayor facilidad y cada componente del medio podría entrar en contacto con este. Por el contrario, en alimentos sólidos el contacto o penetración de las partículas del plasma depende de la composición, la humedad y la porosidad (Surowsky et al., 2016).

Según Laroque et al. (2022) el Plasma Frío (CP) es una tecnología emergente para el procesamiento de alimentos a bajas temperaturas y en poco tiempo. Los parámetros de CP voltaje, frecuencia, tiempo de tratamiento, distancia entre electrodos y composición del gas influyen en el tipo y la concentración de las especies de plasma reactivo. En consecuencia, determinan la eficiencia de CP en desinfección microbiana, inactivación de enzimas, degradación de pesticidas y alérgenos, mejora de aspectos nutricionales y modificación de envases. Sin embargo, la evaluación de seguridad, sensorial y regulatoria puede limitar el uso de PC en el sector alimentario.

El diseño de procesos seguros basados en CP con un impacto mínimo en la calidad debe tener en cuenta la composición de los alimentos, la estructura molecular del envasado y la concentración de microorganismos o moléculas objetivo.

Este trabajo describe en detalle los estudios realizados sobre diferentes alimentos o matrices alimentarias, las variables estudiadas, los cambios y causas de estos.

Gelvez-Ordoñez y Vera (2019) estudiaron el efecto del tiempo de tratamiento (5 y 10 min) con plasma frío (14000V) bajo atmósfera de Helio (0,3 bar) sobre el pH, color e índice de curado en el proceso de curado de la carne bovina. Encontraron que el pH no se vio significativamente afectado por el tratamiento, sin embargo, indicaron

que en estudios realizados por Oehmigen et al. (2010) utilizando aire como gas del proceso, detectaron acumulación de moléculas acidógenas (NO, NO₂, CO₂, HNO₃, HNO₂ y de H₂O) en la superficie de la carne de la carne, deduciendo que la reducción del pH se debió a la acumulación de estas moléculas.

En cuanto al color encontraron que la coordenada de luminosidad L^* aumentó después del tratamiento, mientras la coordenada a^* (rojo-verde) y b^* (amarillo-azul) disminuyeron lo cual se atribuyó a que por efecto del tratamiento ocurre la decoloración de la carne por la formación de la coeglobina, ya que el tratamiento se genera H₂O₂ (peróxido de hidrógeno) el cual reacciona con la mioglobina (Fröhling et al., 2012); mientras que el índice de curado aumento a mayor tiempo de tratamiento debido a que el plasma contiene especies de nitrógeno reactivo que son precursores de nitrito (Jo et al., 2020b; Jung et al., 2015b; Lee et al., 2017).

Verjel et al. (2020) evaluaron el efecto del tratamiento con plasma frío con atmósfera modificada y un flujo de gas de 6 inHg (Helio) durante 0, 2, 5 min y almacenadas en refrigeración (4°C) durante 15 días sobre el color, digestibilidad, microestructura, capacidad de retención de agua (CRA) de emulsiones de proteína cárnica (86.4% de carne de Res (80/20), 8% grasa de cerdo, 1.67% NaCl y 0.019% Nitritos y 0.313% Polifosfatos). En el pH observaron que el tratamiento con plasma frío produjo una baja, la cual resultó no significativa y este comportamiento fue debido a las moléculas acidogénicas (NO_x) formadas durante el tratamiento (Gao et al., 2019). En el color, encontraron que la luminosidad (L^*) disminuye a mayores tiempos de exposición y se conserva durante el tiempo de almacenamiento; en la coordenada a^* del color observaron que a mayor tiempo de tratamiento aumentó en el primer día y con el tiempo de almacenamiento. Por su parte, la coordenada b^* disminuyó con el tiempo de tratamiento y el tiempo de almacenamiento. Estos resultados fueron atribuidos a la oxidación de los pigmentos por radicales generados por el plasma, afectando negativamente el color de la superficie (Sarangapani et al., 2016).

En cuanto al índice de estabilidad de la emulsión encontraron que estas fueron estables e indicaron que fue debido a la formación de redes

tridimensionales que atrapan las partículas de grasa, impidiendo la floculación, coalescencia y la separación de la grasa (Guerrero & Nova, 2018); además, el tratamiento con plasma frío puede modificar las superficies ya que se liberan electrones suficientes para romper enlaces (Sainz-García et al., 2022). Por su parte, la actividad enzimática aumentó con el tiempo de tratamiento y se indicó que este comportamiento se debe a que con el plasma se produce un desplazamiento más rápido del agua en las muestras (Sadhu et al., 2017).

En cuanto a la capacidad de retención de agua, esta disminuyó con el tratamiento lo cual fue atribuido a que por efectos del tratamiento con plasma frío se disminuye el contenido de agua atrapada en la red miofibrilar densa por lo tanto aumenta ($p < 0.05$) el contenido de agua extra miofibrilar (agua libre); por otro lado, el tratamiento con plasma frío conduce a una mayor porosidad de la superficie, cambia en la estructura superficial de la proteína y disminuyen la hidrofobicidad (Sadhu et al., 2017; Verjel, 2020). Además, el tamaño del glóbulo de grasa aumentó. Según Dickson et al. (2010) la estabilidad de las muestras tratadas con plasma frío se ve comprometida dado a que por efecto del tratamiento tiende a aumentar el tamaño promedio de gota y el tamaño de la gota aumenta con el tiempo.

Jo et al. (2020) evaluaron el efecto del tratamiento con plasma frío no térmico (1,5 kW y 60 kHz), a presión atmosférica y aplicado intermitentemente (3 veces con intervalos de tiempo de 1 hora y durante 20 min) con una fuente de descarga a temperatura controlada en el contenido de nitritos, recuento total de bacterias aeróbicas y coliformes, nitrito residual, pH, contenido de hemocromo de nitrosilo, color y oxidación de lípidos de jamones (Carne de cerdo molida 2,6 kg; grasa dorsal 0,4 kg; agua 0,2 kg; cloruro de sodio al 2 %, proteína aislada de soya al 0,3 % y azúcar al 1 % y pirofosfato de sodio al 0,3 %). Encontraron que en el contenido de nitritos fue significativamente mayor y aumentó con el aumento de la descarga de plasma y reportaron que esta formación en el plasma ocurre a través de las reacciones de las especies reactivas del nitrógeno (óxido nítrico o el dióxido nítrico) con el agua (Dickenson et al., 2018; Ercan et al., 2016; Fridman, 2008), y el aumento de la temperatura durante el tratamiento ya que la producción de plasma va acompañado

de reacciones exotérmicas y la aplicación continua de energía aumenta la temperatura del electrodo, lo que trae como consecuencia el aumento de la temperatura del plasma generado (Archambault-Caron et al., 2015; Kim et al., 2015).

En cuanto a los recuentos totales de bacterias aerobias y coliformes indicaron que estos fueron inferiores al límite de detección (1 log CFU/g). Por su parte, el contenido de nitritos residuales (hasta los 20 días de almacenado el producto) fue mayor debido al tratamiento, pero su disminución fue más rápida en los nitritos residuales lo cual fue debido a su continua descomposición en óxido nítrico, oxidación en nitrato y combinación con lípidos o proteínas (Honikel, 2008); Además, a pH bajo se protona el nitrito, lo que promueve su disociación en óxido nítrico y dióxido nítrico (Sebranek, 2009). Lo inmediatamente anterior indica que el pH disminuyó gradualmente al aumentar la generación de nitritos a través de la reacción de especies reactivas de nitrógeno en el plasma con moléculas de agua. Esta reacción en la región de pH neutro va acompañada de la liberación de iones de hidrógeno ocasionando disminución del valor del pH (Jo et al., 2018; Jung et al., 2017; Lee et al., 2018).

Por su parte, el contenido de nitrosil-hemocromo fue significativamente mayor a los 1 y 10 días de almacenamiento lo cual pudo ser causado por el alto contenido de nitrito y la baja de pH por efecto del tratamiento (Ahn & Maurer, 1989; Sebranek, 2009); la baja del pH incidió para que se diera una disminución más rápida del contenido de nitrosilo-hemocromo en el tiempo de observación (Yu et al., 2016). En lo relacionado con el color observaron que el valor de la coordenada a^* aumentó y el valor de la coordenada b^* disminuyó, mientras que la coordenada L^* no se vio afectada, los colores encontrados corresponden a los típicos de productos curados (Lee et al., 2018).

En la oxidación de lípidos, medida por la detección de malondialdehído (MDA), encontraron que este fue significativamente más bajo en las muestras tratadas, lo cual fue debido principalmente a que el óxido nítrico, derivado del nitrito, es un radical lipofílico y puede parar la reacción en cadena de radicales de oxidación de lípidos por estabilización de los

radicales lipídicos como el alquilo ($L\cdot$) y los radicales alcóxido ($LO\cdot$) y peróxido ($LOO\cdot$); este mismo óxido nítrico es muy reactivo con los iones metálicos y estabiliza la mioglobina mediante la formación de nitrosil-mioglobina y hierro libre para generar complejos de nitrosil-metal en productos cárnicos (Bergamaschi & Pizza, 2011; Ford, 2004; Skibsted, 2011).

Gao et al. (2019), el efecto del tratamiento con plasma frío generado a través de descarga de barrera dieléctrica en la microbiota, pH, color, oxidación lipídica de pechuga de pollo molida adicionada con extracto de romero y empacada en atmósferas modificadas. Encontraron que las concentraciones de O_2 y CO_2 fueron significativamente más bajas en los espacios de cabeza de los empaques que contenían el producto, lo cual fue atribuido a la ionización de O_2 y/o CO_2 y las interacciones de estos con los productos originados durante la generación de plasma tales como: gases iónicos, especies reactivas de oxígeno (ROS), especies reactivas de nitrógeno (RNS), radicales, moléculas excitadas entre otros y con diferentes características (Arjunan et al., 2015; Kogelschatz, 2003; Ray & Subrahmanyam, 2016).

En el recuento de bacterias anaerobias el tratamiento redujo la población significativamente lo que se atribuye al efecto antimicrobiano de las especies reactivas de oxígeno (ROS), como el ozono (O_3), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) formados por durante el tratamiento con plasma, las cuales reaccionan con la membrana celular o se difunden a través de ella hacia el centro celular, dañando los componentes internos y provocando la muerte (Han et al., 2016; Hähnel et al., 2010; Laroussi & Leipold, 2004; Lee et al., 2006; Ziuzina et al., 2013). Por otro lado, encontraron que el pH fue significativamente ($P < 0,05$) más bajo debido a la formación de moléculas acidogénicas (NO_x) por efecto del tratamiento aplicado (Oehmigen et al., 2010).

Por su parte, en el color pudieron evidenciar que el plasma frío provoca reducción significativa de los parámetros a^* y b^* , pero no afecta la luminosidad (L^*). En otro aspecto estudiado, el valor de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico-TBARS (Malondialdehído) aumentó, indicando aumento de la oxidación de lípidos por efecto del tratamiento,

lo cual fue atribuido a la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) (H.-J. Kim et al., 2013; Liu et al., 2008).

Bibliografía

- Ahn, D. U., & Maurer, A. J. (1989). Effects of added nitrite, sodium chloride, and phosphate on color, nitrosoheme pigment, total pigment, and residual nitrite in oven-roasted turkey breast. *Poultry Science*, 68(1), 100–106.
- Archambault-Caron, M., Gagnon, H., Nisol, B., Piyakis, K., & Wertheimer, M. R. (2015). Precise energy and temperature measurements in dielectric barrier discharges at atmospheric pressure. *Plasma Sources Science and Technology*, 24(4), 45004.
- Arjunan, K. P., Sharma, V. K., & Ptasinska, S. (2015). Effects of atmospheric pressure plasmas on isolated and cellular DNA—a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(2), 2971–3016.
- Baeza Oliete, G., & Jesús Verdú Martín Valencia, G. (2017). *Contribución a la generación de plasma frío mediante electrodos SMD y JET*. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/86202/BAEZA> - Contribución a la Generación de Plasma Frío Mediante Electrodos Tipo SMD y JET..pdf?sequence=1
- Bergamaschi, M., & Pizza, A. (2011). Effect of pork meat pH on iron release from heme molecule during cooking. *JLS*, 5, 376–380.
- Corradini, M. G. (2019). Modeling microbial inactivation during cold atmospheric-pressure plasma (CAPP) processing. In *Advances in Cold Plasma Applications for Food Safety and Preservation* (pp. 93–108). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814921-8.00003-7>
- Coutinho, N. M., Silveira, M. R., Rocha, R. S., Moraes, J., Ferreira, M. V. S., Pimentel, T. C., Freitas, M. Q., Silva, M. C., Raices, R. S. L., Ranadheera, C. S., Borges, F. O., Mathias, S. P., Fernandes, F. A. N., Rodrigues, S., & Cruz, A. G. (2018). Cold plasma processing of milk and dairy products. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 74, pp. 56–68). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.008>

- Dickenson, A., Britun, N., Nikiforov, A., Leys, C., Hasan, M. I., & Walsh, J. L. (2018). The generation and transport of reactive nitrogen species from a low temperature atmospheric pressure air plasma source. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(45), 28499–28510.
- Dickson, S., Konecny, D., & Robertson, S. (2010). Electron-ion collision frequency in very cold plasma. *APS Division of Plasma Physics Meeting Abstracts*, 52, CP9-054.
- Dirks, B. P., Dobrynin, D., Fridman, G., Mukhin, Y., Fridman, A., & Quinlan, J. J. (2012). Treatment of raw poultry with nonthermal dielectric barrier discharge plasma to reduce *Campylobacter jejuni* and *Salmonella enterica*. *Journal of Food Protection*, 75(1), 22–28.
- Ekezie, F.-G. C., Cheng, J.-H., & Sun, D.-W. (2019). Effects of atmospheric pressure plasma jet on the conformation and physicochemical properties of myofibrillar proteins from king prawn (*Litopenaeus vannamei*). *Food Chemistry*, 276, 147–156.
- Ercan, U. K., Smith, J., Ji, H.-F., Brooks, A. D., & Joshi, S. G. (2016). Chemical Changes in Nonthermal Plasma-Treated N-Acetylcysteine (NAC) Solution and Their Contribution to Bacterial Inactivation. *Scientific Reports*, 6(1), 20365.
- Fitzpatrick, R. (2014). Plasma Physics. In *Plasma Physics*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17263>
- Ford, P. C. (2004). Probing fundamental mechanisms of nitric oxide reactions with metal centers. *Pure and Applied Chemistry*, 76(2), 335–350.
- Fridman, A. (2008). *Plasma chemistry*. Cambridge university press.
- Fröhling, A., Durek, J., Schnabel, U., Ehlbeck, J., Bolling, J., & Schlüter, O. (2012). Indirect plasma treatment of fresh pork: Decontamination efficiency and effects on quality attributes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 16, 381–390. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.09.001>

- Ganesan, A. R., Tiwari, U., Ezhilarasi, P. N., & Rajauria, G. (2021). Application of cold plasma on food matrices: A review on current and future prospects. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(1), e15070.
- Gao, S., Liu, H., Sun, L., Liu, N., Wang, J., Huang, Y., Wang, F., Cao, J., Fan, R., & Zhang, X. (2019). The effects of dielectric barrier discharge plasma on physicochemical and digestion properties of starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 138, 819–830.
- Gao, Y., Zhuang, H., Yeh, H. Y., Bowker, B., & Zhang, J. (2019). Effect of rosemary extract on microbial growth, pH, color, and lipid oxidation in cold plasma-processed ground chicken patties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 57, 102168. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.05.007>
- Gelvez-Ordóñez, V. M., & Vera, N. (2019). Efecto del tratamiento con plasma frío sobre el curado de la carne. *CIBIA*.
- González Elipe, A. R., Gordillo Vázquez, F. J., Tanarro, F. L., & Isabel, T. e. (2013). Plasmas fríos moleculares. Química de plasmas. *Revista Española de Física*, 27, 53-58.
- Gordillo Vasquez, F. J. (2008). Plasmas fríos. *Investigación y Ciencia*, 381, 70–79.
- Graves, D. B. (2012). The emerging role of reactive oxygen and nitrogen species in redox biology and some implications for plasma applications to medicine and biology. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(26), 263001.
- Guerrero Nieto, E. de J., & Nova Garci, J. (2018). *Evaluación de las propiedades texturales y funcionales de una emulsión cárnica empleando mezclas de harina de arroz (oryza sativa) partido y almidón de yuca (manihot esculenta)*.
- Hähnel, M., von Woedtke, T., & Weltmann, K. (2010). Influence of the air humidity on the reduction of Bacillus spores in a defined environment at atmospheric pressure using a dielectric barrier surface discharge. *Plasma Processes and Polymers*, 7(3-4), 244–249.

- Han, L., Patil, S., Boehm, D., Milosavljević, V., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2016). Mechanisms of inactivation by high-voltage atmospheric cold plasma differ for *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(2), 450–458.
- Honikel, K.-O. (2008). The use and control of nitrate and nitrite for the processing of meat products. *Meat Science*, 78(1–2), 68–76.
- Jiang, Q., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Chen, B. (2023). Effects of electric and magnetic field on freezing characteristics of gel model food. *Food Research International*, 112566.
- Jo, K., Lee, J., Lee, S., Lim, Y., Choi, Y.-S., Jo, C., & Jung, S. (2020a). Curing of ground ham by remote infusion of atmospheric non-thermal plasma. *Food Chemistry*, 309, 125643.
- Jo, K., Lee, J., Lee, S., Lim, Y., Choi, Y. S., Jo, C., & Jung, S. (2020b). Curing of ground ham by remote infusion of atmospheric non-thermal plasma. *Food Chemistry*, 309, 125643. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125643>
- Jo, K., Lee, J., Lim, Y., Hwang, J., & Jung, S. (2018). Curing of meat batter by indirect treatment of atmospheric pressure cold plasma. *Korean Journal of Agricultural Science*, 45(1), 94–104.
- Jung, S., Kim, H. J., Park, S., Yong, H. I., Choe, J. H., Jeon, H.-J., Choe, W., & Jo, C. (2015). The use of atmospheric pressure plasma-treated water as a source of nitrite for emulsion-type sausage. *Meat Science*, 108, 132–137.
- Jung, S., Lee, C. W., Lee, J., Yong, H. I., Yum, S. J., Jeong, H. G., & Jo, C. (2017). Increase in nitrite content and functionality of ethanolic extracts of *Perilla frutescens* following treatment with atmospheric pressure plasma. *Food Chemistry*, 237, 191–197.
- Khorram, S., Zakerhamidi, M. S., & Karimzadeh, Z. (2015). Polarity functions' characterization and the mechanism of starch modification by DC glow discharge plasma. *Carbohydrate Polymers*, 127, 72–78.

- Kim, H.-J., Yong, H. I., Park, S., Choe, W., & Jo, C. (2013). Effects of dielectric barrier discharge plasma on pathogen inactivation and the physicochemical and sensory characteristics of pork loin. *Current Applied Physics*, 13(7), 1420–1425.
- Kim, H. Y., Kang, S. K., Park, S. M., Jung, H. Y., Choi, B. H., Sim, J. Y., & Lee, J. K. (2015). Characterization and effects of Ar/Air microwave plasma on wound healing. *Plasma Processes and Polymers*, 12(12), 1423–1434.
- Kogelschatz, U. (2003). Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 23(1), 1–46.
- Laroque, D. A., Seó, S. T., Valencia, G. A., Laurindo, J. B., & Carciofi, B. A. M. (2022). Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 312, p. 110748). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110748>
- Laroussi, M., & Leipold, F. (2004). Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure. *International Journal of Mass Spectrometry*, 233(1–3), 81–86.
- Lee, J., Jo, K., Lim, Y., Jeon, H. J., Choe, J. H., Jo, C., & Jung, S. (2018). The use of atmospheric pressure plasma as a curing process for canned ground ham. *Food Chemistry*, 240, 430–436.
- Lee, J., Lee, C. W., Yong, H. I., Lee, H. J., Jo, C., & Jung, S. (2017). Use of atmospheric pressure cold plasma for meat industry. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 37(4), 477.
- Lee, K.-N., Paek, K., Ju, W.-T., & Lee, Y.-H. (2006). Sterilization of bacteria, yeast, and bacterial endospores by atmospheric-pressure cold plasma using helium and oxygen. *Journal of Microbiology*, 44(3), 269–275.
- Liu, H., Chen, J., Yang, L., & Zhou, Y. (2008). Long-distance oxygen plasma sterilization: Effects and mechanisms. *Applied Surface Science*, 254(6), 1815–1821.

- Locke, B. R., Lukes, P., & Brisset, J.-L. (2012). Elementary chemical and physical phenomena in electrical discharge plasma in gas-liquid environments and in liquids. *Plasma Chemistry and Catalysis in Gases and Liquids*, 185–241.
- Misra, N. N. (2016). Quality of cold plasma treated plant foods. In *Cold plasma in food and agriculture* (pp. 253–271). Elsevier.
- Møller, I. M., Jensen, P. E., & Hansson, A. (2007). Oxidative modifications to cellular components in plants. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 58, 459–481.
- Nehra, V., Kumar, A., & Dwivedi, H. K. (2008). Atmospheric non-thermal plasma sources. *International Journal of Engineering*, 2(1), 53–68.
- Niemira, B. A. (2014). Decontamination of foods by cold plasma. In *Emerging technologies for food processing* (pp. 327–333). Elsevier.
- Oehmigen, K., Hähnel, M., Brandenburg, R., Wilke, C., Weltmann, K., & Von Woedtke, T. (2010). The role of acidification for antimicrobial activity of atmospheric pressure plasma in liquids. *Plasma Processes and Polymers*, 7(3-4), 250–257.
- Okyere, A. Y., Bertoft, E., & Annor, G. A. (2019). Modification of cereal and tuber waxy starches with radio frequency cold plasma and its effects on waxy starch properties. *Carbohydrate Polymers*, 223, 115075.
- Ray, D., & Subrahmanyam, C. (2016). CO₂ decomposition in a packed DBD plasma reactor: influence of packing materials. *Rsc Advances*, 6(45), 39492–39499.
- Sadhu, S., Thirumdas, R., Deshmukh, R. R., & Annapure, U. S. (2017). Influence of cold plasma on the enzymatic activity in germinating mung beans (*Vigna radiata*). *Lwt*, 78, 97–104.
- Sainz-García, A., Toledano, P., Muro-Fraguas, I., Álvarez-Erviti, L., Múgica-Vidal, R., López, M., Sainz-García, E., Rojo-Bezares, B., Sáenz, Y., & Alba-Elías, F. (2022). Mask disinfection using atmospheric pressure cold plasma. *International Journal of Infectious Diseases*, 123, 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2022.08.012>

- Sarangapani, C., Keogh, D. R., Dunne, J., Bourke, P., & Cullen, P. J. (2017). Characterisation of cold plasma treated beef and dairy lipids using spectroscopic and chromatographic methods. *Food Chemistry*, 235, 324–333.
- Sarangapani, C., Thirumdas, R., Devi, Y., Trimukhe, A., Deshmukh, R. R., & Annapure, U. S. (2016). Effect of low-pressure plasma on physico-chemical and functional properties of parboiled rice flour. *LWT-Food Science and Technology*, 69, 482–489.
- Schröter, S., Wijaikhum, A., Gibson, A. R., West, A., Davies, H. L., Minesi, N., Dedrick, J., Wagenaars, E., De Oliveira, N., & Nahon, L. (2018). Chemical kinetics in an atmospheric pressure helium plasma containing humidity. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(37), 24263–24286.
- Sebranek, J. G. (2009). Basic curing ingredients. *Ingredients in Meat Products: Properties, Functionality and Applications*, 1–23.
- Sega, A., Zanardi, I., Chiasserini, L., Gabbrielli, A., Bocci, V., & Travagli, V. (2010). Properties of sesame oil by detailed ¹H and ¹³C NMR assignments before and after ozonation and their correlation with iodine value, peroxide value, and viscosity measurements. *Chemistry and Physics of Lipids*, 163(2), 148–156.
- Segat, A., Misra, N. N., Cullen, P. J., & Innocente, N. (2015). Atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment of whey protein isolate model solution. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 29, 247–254.
- Skibsted, L. H. (2011). Nitric oxide and quality and safety of muscle based foods. *Nitric Oxide*, 24(4), 176–183.
- Surowsky, B., Bußler, S., & Schlüter, O. K. (2016). Cold plasma interactions with food constituents in liquid and solid food matrices. In *Cold plasma in food and agriculture* (pp. 179–203). Elsevier.
- Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmaison, J., & Leprince, P. (2006). Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 61(1), 2–30.

- Thirumdas, R., Trimukhe, A., Deshmukh, R. R., & Annapure, U. S. (2017). Functional and rheological properties of cold plasma treated rice starch. *Carbohydrate Polymers*, 157, 1723–1731.
- Turner, M. (2016). Physics of cold plasma. In *Cold plasma in food and agriculture* (pp. 17–51). Elsevier.
- Verjel Delgado, M. F. (2020). *Efecto del tratamiento con plasma frío sobre emulsiones cárnicas*.
- Verjel, M. F. (2020). *Efecto del tratamiento con plasma frío sobre emulsiones cárnicas* [Universidad de Pamplona]. http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/4793/1/Verjel_2019_TG.pdf
- Xu, Y., Tian, Y., Ma, R., Liu, Q., & Zhang, J. (2016). Effect of plasma activated water on the postharvest quality of button mushrooms, *Agaricus bisporus*. *Food Chemistry*, 197, 436–444.
- Young, R. A., & St. John, G. A. (1969). *Reactions of N₂ (A 3 Σ + u)* (pp. 105–117). <https://doi.org/10.1021/ba-1969-0080.ch008>
- Yu, C., Jiao, J., Ma, L., & Sun, W. (2016). Effect of pH on the stability and molecular structure of nitrosyl hemochromogen. *Food Chemistry*, 196, 503–508.
- Ziuzina, D., Patil, S., Cullen, P. J., Keener, K. M., & Bourke, P. (2013). Atmospheric cold plasma inactivation of *Escherichia coli* in liquid media inside a sealed package. *Journal of Applied Microbiology*, 114(3), 778–787.

Perfil del autor

El Dr. Víctor Manuel Gelvez Ordóñez es un destacado investigador y profesional en Ingeniería de Alimentos, reconocido por su amplio aporte en tecnologías emergentes aplicadas al procesamiento y conservación de alimentos. Cuenta con formación doctoral en Ciencia y Tecnología de Alimentos (Universidad de Barcelona), Proyectos de Innovación Tecnológica (Universitat Politècnica de Catalunya) y Calidad de la Educación e Inclusión (OIICE). Además, posee maestrías en Ciencias de los Alimentos y en Innovación Tecnológica, complementadas con especializaciones en Comunicación Educativa y Gestión de Proyectos de Investigación.

Su trabajo científico se ha enfocado en el desarrollo de procesos innovadores en tecnologías emergentes para el procesamiento de alimentos, en especial: ultrasonido, campos magnéticos, tecnología de alta presión isostática y tratamiento con plasma frío, con aplicaciones concretas en la mejora de la calidad microbiológica y funcional de productos como quesos, emulsiones cárnicas, carne de atún, huevo líquido, cacao, entre otros. Ha contribuido ampliamente a la generación de conocimiento en el impacto de estas tecnologías en las propiedades físico-químicas, texturales, reológicas y microbiológicas de alimentos, promoviendo la creación de productos funcionales con valor agregado para la industria alimentaria.

Como ponente internacional en numerosos congresos y líder de proyectos científicos, el Dr. Gelvez Ordóñez ha consolidado una sólida trayectoria que integra formación interdisciplinaria, innovación tecnológica y un compromiso con el bienestar social a través del desarrollo sostenible de alimentos funcionales. De igual manera, es autor de diferentes artículos en revistas indexadas y el ámbito académico.

 <https://orcid.org/0000-0001-5804-9585>

