



Scientia Agropecuaria

Web page: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>

Facultad de Ciencias
Agropecuarias

Universidad Nacional de
Trujillo

REVIEW



Emerging non-thermal technologies in the food industry: Advances and potential applications in food processing

Tecnologías emergentes no térmicas en la industria alimentaria: Avances y potenciales aplicaciones en el procesamiento de alimentos

Luz María Paucar-Menacho^{1*} ; Cesar Moreno-Rojo¹ ; Saúl Ricardo Chuqui-Diestra² 

¹ Departamento Académico de Agroindustria y Agronomía, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Santa, Av. Universitaria s/n, Urb. Bellamar, Nuevo Chimbote, Ancash, Perú.

² Departamento Académico de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Portal Independencia N° 57 – Huamanga, Ayacucho, Perú.

* Corresponding author: luzpaucar@uns.edu.pe (L.M. Paucar-Menacho).

Received: 7 December 2023. Accepted: 13 January 2024. Published: 5 February 2024.

Abstract

Currently, the food industry prioritizes the safety and quality of products, facing the challenge of maintaining sensory and nutritional integrity. To address this challenge, emerging non-thermal technologies are being explored that offer significant advantages in improving food quality over conventional technologies. This review aims to provide a comprehensive understanding of how these innovative technologies can transform the traditional food processing landscape as we know it. Non-thermal technologies have the potential to reduce energy consumption for food production, processing and packaging, compared to conventional thermal treatments. Furthermore, these technologies are particularly suitable for efficiently preserving bioactive compounds present in foods. This review describes the fundamental principles, applications, advantages and limitations of emerging technologies in food processing. These technologies include pulsed electric field, ultrasound, cold plasma, high pressure, irradiation, light-emitting diodes, pulsed light and oscillating magnetic fields. Despite the large number of studies on the subject, more research is required to optimize and improve the efficiency of the application of these technologies, alone or in combination, in food processing. The bioaccessibility and bioactivity of the compounds, nutritional value, shelf life and sensory aspects may be variables of interest.

Keywords: Emerging technologies; food preservation; food preservation; bioactive substances; green technologies; functional foods.

Resumen

En la actualidad, la industria alimentaria da prioridad a la seguridad y calidad de los productos, enfrentándose al desafío de mantener la integridad sensorial y nutricional. Para abordar este desafío, se vienen explorando tecnologías no térmicas emergentes que ofrecen ventajas significativas en la mejora de la calidad de los alimentos frente a las tecnologías convencionales. Esta revisión tiene como objetivo proporcionar una comprensión integral de cómo estas tecnologías innovadoras pueden transformar el panorama tradicional del procesamiento de alimentos tal como lo conocemos. Las tecnologías no térmicas tienen el potencial de reducir el consumo de energía destinado a la producción, procesamiento y envasado de alimentos, en comparación con los tratamientos térmicos convencionales. Además, estas tecnologías son particularmente adecuadas para preservar eficientemente los compuestos bioactivos presentes en los alimentos. En esta revisión se describen los principios fundamentales, aplicaciones, ventajas y limitaciones de las tecnologías emergentes en el procesamiento de alimentos. En estas tecnologías se incluyen, campo eléctrico pulsado, ultrasonido, plasma frío, alta presión, irradiación, diodos emisores de luz, luz pulsada y campos magnéticos oscilantes. A pesar de la gran cantidad de estudios respecto al tema, se requiere mayor investigación para optimizar y mejorar la eficiencia de la aplicación de estas tecnologías, solas o en combinación, en el procesamiento de alimentos. La bioaccesibilidad y bioactividad de los compuestos, el valor nutricional, la vida útil y los aspectos sensoriales pueden ser variables de interés.

Palabras clave: Tecnologías emergentes; conservación de alimentos; preservación de alimentos; sustancias bioactivas; tecnologías verdes; alimentos funcionales.

DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.006>

Cite this article:

Paucar-Menacho, L. M., Moreno-Rojo, C., & Chuqui-Diestra, S. R. (2024). Tecnologías emergentes no térmicas en la industria alimentaria: Avances y potenciales aplicaciones en el procesamiento de alimentos. *Scientia Agropecuaria*, 15(1), 65-83.

1. Introducción

Se han registrado continuos avances e innovaciones en la industria alimentaria, con la introducción de alimentos enriquecidos con compuestos bioactivos (Pattnaik et al., 2021). Estudios epidemiológicos respaldan la idea de que, al incorporar estos alimentos de manera regular en la dieta, se pueden experimentar efectos beneficiosos y reducir la incidencia de enfermedades (Pérez-Jiménez, 2019). A pesar de estos beneficios, al procesar dichos alimentos para su comercialización, como en la elaboración de bebidas, mermeladas, conservas, entre otros productos, se producen alteraciones en su composición. Uno de los cambios más significativos es la pérdida de compuestos bioactivos, como compuestos fenólicos, vitaminas y ciertos colorantes específicos. Este fenómeno se debe a la sensibilidad de estos compuestos a la oxidación química y a la degradación térmica que ocurre durante el procesamiento del producto (Rodríguez-Roque et al., 2015).

Tradicionalmente, los productos alimenticios se someten a tratamientos térmicos clásicos, que implican calentar el producto a una temperatura y durante un tiempo específico. Dependiendo de la intensidad del calor, estos tratamientos se clasifican en pasteurización (65 – 90 °C), esterilización (110 – 121 °C) y temperatura ultraalta (140 – 160 °C) (Chantakun & Benjakul, 2022). Aunque estos tratamientos térmicos clásicos son efectivos para eliminar patógenos, reducir microorganismos y aumentar la vida útil de los productos alimenticios (Augusto, 2020), también afectan negativamente las características sensoriales, los sabores y el contenido nutricional de los alimentos. La tecnología de procesamiento no térmico ha ganado considerable atención en la industria alimentaria (Huang et al., 2017).

Por ende, se ha explorado recientemente el uso de diversas tecnologías para prevenir estas pérdidas e incluso estimular la síntesis de compuestos bioactivos y antioxidantes. Estas tecnologías ofrecen la posibilidad de controlar la maduración, reducir la contaminación por agentes dañinos y prolongar los beneficios nutracéuticos en procesos primarios como el congelado, picado, trozado y pelado (Poonia et al., 2022).

Las tecnologías emergentes pueden clasificarse como tecnologías no térmicas (plasma frío, ultrasonido, procesamiento de alta presión, irradiación, luz pulsada, campos eléctricos pulsados y luz ultravioleta) o tecnologías térmicas (calentamiento óhmico, calentamiento por microondas y termosonicación) (Ribeiro et al., 2022). La aplicación de tecnologías emergentes presenta ventajas notables, como

mantener concentraciones más altas de compuestos bioactivos, propiedades funcionales mejoradas (generación de compuestos antioxidantes, antidiabéticos y antihipertensivos) y una mayor y más diversificada presencia de compuestos volátiles, lo que hace que los productos alimenticios sean más atractivos (Al-Juhaimi et al., 2018). El procesamiento no térmico ha sido aprobado para mejorar la calidad de los alimentos, reducir el uso de agua, disminuir las emisiones, aumentar la eficiencia energética, garantizar un etiquetado limpio y reducir el desperdicio de alimentos (Nabi et al., 2021). La aplicación de procesamiento no térmico proporciona valor añadido y subproductos, así como energía limpia y asequible, contribuyendo a la reducción de emisiones de carbono y huella hídrica, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Arshad et al., 2021).

El propósito de este trabajo de revisión es documentar las tecnologías emergentes no térmicas actuales que ofrecen, de manera efectiva, la conservación de compuestos bioactivos en alimentos, describiendo aplicaciones, parámetros, ventajas y limitaciones de cada uno. Con el fin de proporcionar soluciones y mejorar procesos existentes que necesitan adaptarse a las nuevas tendencias.

2. Tecnologías emergentes no térmicas

En la industria alimentaria, es crucial emplear operaciones unitarias o tratamientos, principalmente térmicos, con el objetivo de prolongar la vida útil de los alimentos (Figueroa-Sepúlveda, 2021). En el procesamiento térmico, los alimentos se exponen a altas temperaturas durante un período prolongado lo que provoca la disminución de su calidad sensorial y nutricional (Iqbal et al., 2019). Esto es especialmente relevante en el caso de frutas, hortalizas y productos elaborados que son fuentes significativas de compuestos bioactivos, afectando así el valor nutritivo natural de estos alimentos (Gabrić et al., 2017).

Estas preocupaciones han llevado al sector agroalimentario a desarrollar y adaptar diversas tecnologías sostenibles adecuadas para el procesamiento de alimentos (Jadhav et al., 2021). En este contexto, las tecnologías emergentes no térmicas se destacan, porque se refieren a métodos de procesamiento de alimentos que no dependen de altas temperaturas. Estas tecnologías son consideradas emergentes en la industria alimentaria debido a su potencial para mejorar la seguridad y calidad de los alimentos (Radhakrishnan et al., 2023).

El objetivo principal de estas tecnologías es sustituir las técnicas tradicionales de procesamiento para fabricar alimentos de mayor calidad, adaptados a las

preferencias de los consumidores (Priyadarshini et al., 2018). Estas se consideran alternativas viables puesto que provocan un daño mínimo a las propiedades nutricionales y sensoriales del producto final (Hernández-Hernández et al., 2019). Entre las tecnologías emergentes mencionadas por los investigadores, se encuentran el ultrasonido, las microondas y el campo eléctrico pulsado. Además, existen otras alternativas de procesamiento no térmico, como la luz pulsada, la radiación ionizante, la alta presión hidrostática, los campos magnéticos oscilantes, la luz ultravioleta y el plasma frío (Olatunde & Benjakul, 2018). Estas opciones ofrecen enfoques innovadores que pueden preservar la conservación de los compuestos bioactivos y el valor nutritivo de los productos alimentarios (Chakka et al., 2021).

2.1 Campo eléctrico pulsado

El campo eléctrico pulsado (PEF) es una técnica utilizada para la conservación de alimentos, donde se emplean pulsos cortos, que varían desde nanosegundos hasta milisegundos, con diferentes intensidades de campo eléctrico (Zhang et al., 2020). El equipo necesario consta de una cámara de tratamiento, una fuente de alimentación pulsada y un sistema de control y monitoreo, tal y como se muestra en la Figura 1 (Buchmann et al., 2018). El producto a tratar se coloca entre un conjunto de electrodos que confinan el espacio de tratamiento dentro de la cámara PEF (Wang et al., 2018). Se utiliza un generador de energía de impulsos para suministrar el alto voltaje pulsante a través de la cámara de tratamiento que contiene los alimentos (Sack & Mueller, 2017).

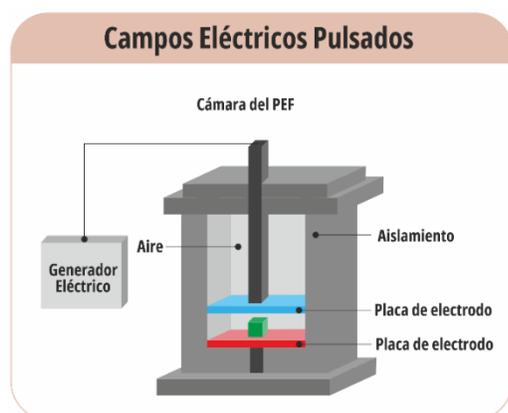


Figura 1. Representación gráfica de la tecnología de campo eléctrico pulsado.

El procesamiento del PEF se logra mediante la aplicación repetida de pulsos con una intensidad de campo eléctrico que oscila entre 0,1 y 100 kV/cm a los alimentos ubicados entre los electrodos (Wang et al., 2020). Para eliminar microorganismos, se aplica un voltaje de 15 a 80 kV/cm con varios pulsos

de 1 a 5 μ s, mientras que para la extracción no térmica y la electroporación de células vegetales se utiliza 0,1 a 5 kV/cm con pulsos de 10 a 1000 μ s (Arshad et al., 2020).

A diferencia de otras tecnologías, el PEF se puede emplear en medios sólidos, semilíquidos y líquidos (Arshad et al., 2021). En los últimos años, el procesamiento por PEF ha captado gran atención en la industria alimentaria. En aplicaciones industriales, existen diversos sistemas a escala comercial para el procesamiento de alimentos líquidos y sólidos (Blahovec et al., 2017). El procesamiento por PEF presenta ventajas significativas, como una temperatura de tratamiento más baja, un tiempo de procesamiento más corto, un menor consumo de energía, una mayor transferencia de calor y masa, y mejora la calidad de los alimentos. Además, prolonga la vida útil de los productos sin dejar residuos químicos ni contaminar el medio ambiente (Zhang et al., 2020). En la Tabla 1 se describen los efectos y parámetros de la aplicación de campo eléctrico pulsado en diversos alimentos.

2.2 Ultrasonido

El ultrasonido es una tecnología emergente que puede emplearse para reducir el procesamiento, preservar la calidad y asegurar la inocuidad alimentaria (Chen et al., 2020). Se trata de una técnica no térmica única que utiliza ondas sonoras para generar fenómenos de cavitación, induciendo cambios mecánicos y químicos en los materiales alimentarios (Yasui & Yasui, 2018). En la Figura 2 se muestran dos tipos de ultrasonido: un baño ultrasónico y una sonda ultrasónica.

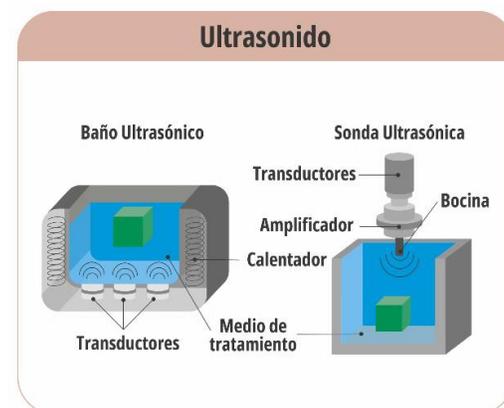


Figura 2. Representación gráfica de la tecnología de ultrasonido.

Las ondas ultrasónicas se dividen en ultrasonidos de alta intensidad (también llamados ultrasonidos de baja frecuencia o de potencia, de 20 a 100 kHz) y ultrasonidos de baja intensidad (también llamados ultrasonidos no destructivos o de alta frecuencia, de 5 a 10 MHz) (Bevilacqua et al., 2018).

Tabla 1

Efecto de la aplicación de campo eléctrico pulsado sobre compuestos bioactivos en alimentos

Muestra	Parámetros	Efectos relevantes	Referencia
Remolacha	Intensidad de campo eléctrico: 4,38 y 6,25 kV/cm; Pulsos: 10-30; Aporte energético: 0-12,5 kJ/kg	Un aumento en el contenido de compuestos de betalaina en un 329% y vulgaxantina en un 244%.	Nowacka, et al. (2019)
Grosella negra	Intensidad de campo eléctrico: 0-1950 V/cm; Pulsos: 50-500	Incrementos del 19%, 45% y 6% para contenido total de polifenoles, actividad antioxidante y antocianinas monoméricas totales, respectivamente.	Gagneten et al. (2019)
Zumo de pomelo	Intensidad del campo eléctrico: 20 kV/cm; Caudal: 80 ml/min; Frecuencia del pulso: 1 kHz; Temperatura, 40 °C; Tiempo: 600 µs	Con el tratamiento, el contenido de carotenoides, licopeno, antocianinas y la actividad antioxidante total aumentaron un 22,62%, 93,75%, 15,33% y 92,99%, respectivamente.	Aadil et al. (2017)
Palmera datilera	Intensidad del campo eléctrico: 1, 2 y 3 kV/cm; Frecuencia: 10 Hz; Tiempo: 100 µs; Pulso: 30	Incrementos del 7,76%, 110,94% y 114,04% para contenido total de polifenoles, contenido total de flavonoides y contenido total de carotenoides en comparación con la muestra de control.	Siddeeg et al. (2019)
Zumo de albaricoque	Intensidad del campo eléctrico: 0, 7 y 14 kV/cm; Caudal: 40 ml/min; Frecuencia: 1 kHz; Temperatura: 25 ± 2 °C; Tiempo: 500 µs.	Incrementos del 8,99%, 83,32% y 20,85% para contenido total de polifenoles, flavonoides y DPPH% inhibition, en comparación con la muestra de control.	Rahaman et al. 2020

Se ha identificado y revisado que la letalidad de los microorganismos causada por la sonicación se debe a un fenómeno conocido como cavitación transitoria, en el cual los ciclos de presión generan numerosas burbujas microscópicas (Pérez-Andrés et al., 2018). Bajo la acción del ultrasonido, estas burbujas oscilan, crecen y estallan, generando temperaturas de hasta 5000 K y presiones de hasta 50 MPa en breves momentos. Este proceso va acompañado de intensas ondas de choque y microchorros de 400 km/h (Suslick et al., 2011). Estos aumentos extremos de temperatura, cambios de presión y formación de radicales dañan las paredes de los microorganismos, provocando un estrés físico significativo y reduciendo la viabilidad de los mismos (Leong et al., 2017).

El ultrasonido de baja intensidad y alta frecuencia tiene aplicaciones analíticas que proporcionan información sobre las propiedades fisicoquímicas de los alimentos, como su composición, estructura y condición (Carrillo-Lopez et al., 2021). A diferencia de las técnicas analíticas convencionales, estas mediciones son rápidas, no invasivas y no destructivas, siendo fácilmente aplicables tanto en laboratorios como en líneas de producción (Chávez-Martínez et al., 2020). Por otro lado, los ultrasonidos de alta potencia, también conocidos como ultrasonidos de alta intensidad, alteran las propiedades físicas, químicas o mecánicas de los alimentos. En el ámbito de la bioquímica, inicialmente se utilizaron para romper las paredes celulares y liberar su contenido (Guimarães et al., 2018).

En comparación con la tecnología térmica tradicional, el ultrasonido puede reducir el tiempo de procesamiento, ahorrar energía, mejorar la calidad de los alimentos y prolongar su vida útil (Yuan et al., 2021). Además, los equipos de ultrasonido pueden

ser altamente automatizados, lo que ahorra costos de mano de obra (Chen et al., 2020). También se ha aplicado eficientemente en la industria de procesamiento de alimentos en conjunto con varios procesos, como congelación, filtración, secado, separación, emulsión, esterilización y extracción. Diversas investigaciones han señalado que los ultrasonidos conducen a un aumento del rendimiento de estos procesos y mejoran los factores de calidad de los alimentos (Singla & Sit, 2021). En la Tabla 2 se describe la aplicación de ultrasonido en diversos alimentos, detallando el tipo de alimento, los parámetros y los efectos más puntuales.

2.3 Plasma frío

El plasma frío se destaca por su capacidad para garantizar la seguridad y calidad de los alimentos (Waghmare, 2021). Su formación implica el aumento de la energía del gas del material, lo que induce la reorganización de la estructura eléctrica de átomos y moléculas (Yangıç & Karagözlü, 2017). En la fase gaseosa, cada átomo normalmente posee una carga positiva y negativa. Al suministrar energía a la sustancia en esta fase, se incrementa el vacío relativo entre los átomos o moléculas, lo que conduce a la ionización, separando los electrones del compuesto (Kart et al., 2018). Este proceso de ionización se repite en un gas energizado, dando lugar a la formación de nubes de electrones libres e iones. Como resultado, se generan partículas cargadas positivamente (iones), partículas cargadas negativamente (electrones) y partículas sin carga, constituyendo lo que conocemos como plasma (Wolf, 2012). En la Figura 3 se describe dos tipos de quipos de plasma frío: plasma frío DBD y plasma jet. El plasma térmico requiere niveles extremos de presión (2105 Pa) y potencia (hasta 50 MWatts), mientras que el no térmico se caracteriza por

temperaturas de electrones entre 104-108 K. Este último tipo es más aplicado en las industrias alimentarias, mostrando efectividad en la inactivación de enzimas, y el aumento de la actividad de la amilasa y antioxidantes (Tirado-Kulieva et al., 2021). Además, el plasma frío demuestra capacidad para inactivar microorganismos, bacterias, mohos, levaduras, esporas e incluso virus en la superficie de alimentos, dependiendo de las condiciones de tratamiento y del tipo de gas (oxígeno, aire, argón, helio) utilizado para la formación del plasma (Sánchez-Moreno et al., 2018). En la **Tabla 3** se describe la aplicación de plasma frío en diversos alimentos, centrándose en los efectos y parámetros más puntuales. En términos de sostenibilidad ambiental, el plasma atmosférico frío destaca por no requerir agua ni productos químicos adicionales, generar cero residuos y no dejar residuos químicos. Su aplicación

puede contribuir a la reducción del consumo de agua y energía en plantas procesadoras de alimentos debido a su bajo requerimiento energético (Zadeh & Pazir, 2023).

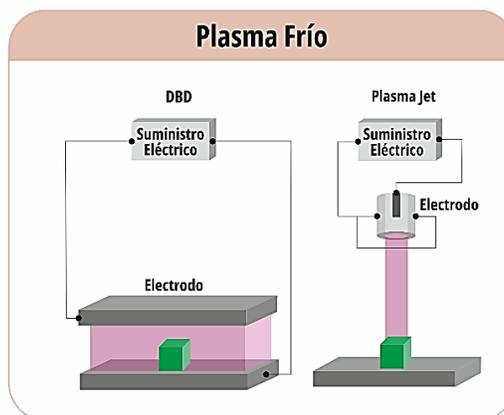


Figura 3. Representación gráfica de la tecnología de plasma frío.

Tabla 2
Efecto de la aplicación de ultrasonido sobre compuestos bioactivos en alimentos

Muestra	Parámetros	Efectos relevantes	Referencia
Néctar de camu-camu	Frecuencia: 40 kHz; Temperatura: 40, 50 y 60 °C; Tiempo: 30 - 60 min	El contenido de ácido ascórbico, antocianinas y contenido total de flavonoides totales aumentaron un 2,61%, 38,54% y 45,74%, respectivamente.	do Amaral et al. (2019)
Jugo de acerola	Potencia: 3300 W/L; Tiempo: 2, 6, y 10 min	La concentración de vitamina C y compuestos fenólicos aumentó significativamente en un 19% y un 7%.	do Nascimento et al. (2022)
Cáscara de mango	Potencia: 400 W; Frecuencia: 24 kHz; Tiempo: 15 min.	El contenido total de polifenoles presentó un aumento medio del 630% cuando se aplicó el ultrasonido.	Martínez-Ramos et al. (2020)
Hojas de moringa	Potencia: 160 W; Frecuencia: 35 kHz; Tiempo: 10, 20 y 30 min; Temperatura: 30, 40 y 50 °C	El contenido total de polifenoles y contenido total de flavonoides fueron del 8,37% y 18,6%, respectivamente. Además, la actividad antioxidante por DPPH y ABTS aumentó un 38,71% y 4,15%, respectivamente.	Dadi et al. (2019)
Jugo de Buriti	Diámetro de sonda: 25 mm; Densidad de energía: 0, 0,9, 1,8, 2,7 y 3,6 kJ/cm ³ ; Potencia: 750 W; Frecuencia: 20 kHz	Aumento de hasta el 90% en el contenido de carotenoides e incremento del 28% en el contenido de compuestos fenólicos.	de Souza et al. (2020)

Tabla 3
Efecto de la aplicación de plasma frío sobre compuestos bioactivos en alimentos

Muestra	Parámetros	Efectos relevantes	Referencia
Brotos de arroz integral	Potencia: 1-3 kV; corriente: 1,2 mA; presión: 800 Pa; tiempo: 10 min	El ácido gamma-aminobutírico (GABA) y el contenido total de polifenoles aumentaron en un 47,36% y 35,29%, respectivamente.	Chen et al. (2016)
Pitaya	Potencia: 40, 50, 60 y 70 kV; Tiempo: 1, 3, 5 y 7 min	El contenido total de polifenoles y actividad antioxidante aumentaron significativamente en un 78,17% y 47,3%, respectivamente.	Li et al. (2019)
Jugo de siriguela	Potencia: 80 W; frecuencia: 50 kWz; caudal de gas: nitrógeno 10-30 mL/min; tiempo: 5-15 min	El contenido total de polifenoles y actividad antioxidante por DPPH y ABTS aumentaron significativamente en un 58,27%, 55,5% y 23,18%, respectivamente.	Paixão et al. (2018)
Brotos de frijol Mungo	Potencia: 5 kV; frecuencia: 40 kWz; tiempo: 15, 30, 60 y 90 s	La actividad antioxidante por ABTS y FRAP aumentó en un 2,53% y 5,37%, respectivamente.	Fan et al. (2020)
Zumo de granada	Potencia: 4 W; flujo de gas: argón 0,75, 1 y 1.25 dm ³ /min; campo eléctrico: 25 kHz; volumen de muestra: 3, 4 y 5 cm ³ ; tiempo: 3, 5 y 7 min	El contenido total de polifenoles aumentó significativamente en un 33,3%.	Herceg et al. (2016)

2.4 Alta presión

La tecnología de procesamiento a alta presión (HPP) emerge como una metodología no térmica altamente eficaz para la producción de alimentos de alta calidad, preservando las características inherentes de los productos frescos y extendiendo su vida útil. Este enfoque implica someter productos sellados a niveles considerables de presión isostática, generalmente entre 40000 y 80000 libras/pulgada cuadrada (psi), o 100 – 800 MPa, durante períodos breves, típicamente no superiores a 5 minutos, con variaciones de temperatura entre 0 – 100 °C (Marangoni & Anjos, 2018). La presión se distribuye uniformemente a lo largo de la muestra, evitando tratamientos desiguales (Woldemariam & Emire, 2019).

En la industria alimentaria, esta tecnología encuentra aplicación principal en la preservación de mermeladas, jaleas de frutas, salsas y jugos de frutas (Daher et al., 2017). El proceso implica colocar el alimento, ya sea líquido o sólido, en un recipiente presurizado lleno de un medio de transferencia de presión, comúnmente agua (Figura 4). Según el principio isostático o de Pascal, la presión hidrostática se transmite equitativamente e instantáneamente a través del medio de transferencia de presión al producto (Economou et al., 2020).

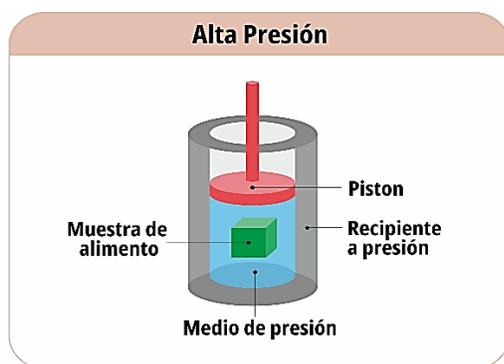


Figura 4. Representación gráfica de la tecnología de alta presión.

Tabla 4

Efecto de la aplicación de alta presión sobre compuestos bioactivos en alimentos

Muestra	Parámetros	Efectos relevantes	Referencia
Zanahoria	Presión: 60 y 100 MPa; ritmo: 4,06-4,61 MPa/s; temperatura: 22 °C.	El contenido total de polifenoles aumentó significativamente en un rango del 69,1% al 154,9%.	Viacava et al. (2020)
Cascara de tomate	Diámetro de orificio: 150 µm; presión: 100 MPa; pasadas: 1, 3, 5, 7 y 10; temperatura: 24 °C.	El contenido total de polifenoles y actividad antioxidante aumentaron significativamente en un 32,2% y 23,3%, respectivamente.	Jurić et al. (2019)
Açaí.	Presión: 400-600 MPa; tiempo: 5-15 min; temperatura: 25 y 65 °C.	El contenido total de polifenoles y antocianinas aumentaron significativamente en un 10,25% y 37%, respectivamente.	de Jesus et al. (2020)
Mango	Presión: 20, 40, 60 y 80 MPa; tiempo: 10 min; temperatura: 20 ± 1 °C.	El contenido total de polifenoles y flavonoides aumentaron significativamente en un 26,4% y 30%, respectivamente.	Hu et al. (2021)
Maíz morado	Presión: 250, 450 y 650 MPa; tiempo: 3 min; temperatura: 25, 45 y 65 °C.	El contenido de polifenoles totales y antocianinas monoméricas aumentaron significativamente en un 26% - 28% y 12% - 51%, respectivamente.	Guillén et al. (2023)

El efecto de pasteurización mediante HPP no se ve afectado por la forma del empaque ni el volumen de los alimentos, permitiendo así el procesamiento de alimentos de diferentes volúmenes en un mismo lote. Además, esta tecnología asegura la seguridad microbiológica sin la necesidad de añadir conservantes, preservando los sabores naturales y el valor nutricional del alimento original (Balasubramaniam et al., 2015). La inactivación de microorganismos, esporas y enzimas dañinas y patógenas es un resultado directo de la presión, en lugar de depender de la temperatura, preservando así las propiedades organolépticas y nutricionales del producto final (Khouryieh, 2021).

Los alimentos tratados con alta presión suelen exhibir una calidad superior en comparación con aquellos procesados térmicamente, manteniendo un valor nutricional, sabor, textura y color superiores (Abera, 2019). Aunque diversos estudios han resaltado los beneficios de esta técnica en la conservación de la calidad de los alimentos, se debe tener en cuenta que los altos costos de inversión y el rendimiento limitado representan desafíos para su implementación, especialmente en el procesamiento de alimentos líquidos (Naveena & Nagaraju, 2020). En la Tabla 4 se describe la aplicación de alta presión en diversos alimentos, detallando el tipo de alimento, los parámetros y los efectos más puntuales.

2.5 Irradiación

La irradiación es un procedimiento mediante el cual se exponen alimentos a varios haces de radiación con el propósito de esterilizarlos y prolongar su vida útil. Este proceso se basa en la excitación e ionización, lo cual provoca cambios en los componentes de los alimentos cuando la fuente de radiación entra en contacto con ellos (Ravindran & Jaiswal, 2019). Esto inhibe la síntesis de ADN en seres vivos, deteniendo así el crecimiento de patógenos bacterianos (Zhao et al., 2017).

La irradiación interfiere con los procesos biológicos responsables de la putrefacción y evita el crecimiento de microorganismos (Indiarto et al., 2020). En términos generales, la irradiación se describe como un haz de luz que penetra en un material alimentario con intensidades diversas, dependiendo de la longitud de onda, y siendo inversamente proporcional a la frecuencia. A menor longitud de onda, mayor es la capacidad de penetración (Mustafa et al., 2013). Un requisito clave de la irradiación de alimentos es la dosis utilizada, ya que cada dosis tiene un propósito específico (Wojcik & Harms-Ringdahl, 2019). Superar el límite de dosis puede ocasionar daños a los materiales alimentarios (Handayani & Permawati, 2017). La irradiación de alimentos es una técnica no térmica que implica el uso controlado de radiaciones ionizantes como rayos gamma, rayos beta y rayos X. Los rayos beta se generan a partir de aceleradores de electrones, mientras que los rayos X provienen de generadores de rayos X. Los rayos gamma, son mayormente utilizados en el procesamiento de alimentos, se obtienen de una fuente de radionúclidos de 60-Cobalto (Ravindran & Jaiswal, et al., 2019) (Figura 5).

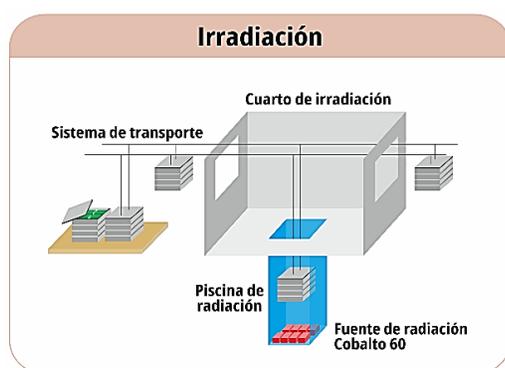


Figura 5. Representación gráfica de la tecnología de irradiación.

Esta tecnología de irradiación de alimentos se presenta como una opción respetuosa con el medio ambiente, sin la necesidad de utilizar productos químicos y sin generar contaminación. Su aplicación sostenible en el sector alimentario responde a desafíos como el aumento de la población, la escasez de tierras agrícolas, la globalización y la demanda internacional de calidad y seguridad alimentaria (Zhou et al., 2012).

A nivel mundial, distintos países han establecido límites reglamentarios para la irradiación de diversos productos alimentarios. Aunque no fue inicialmente popular, estudios recientes han proporcionado evidencia de los beneficios y la seguridad de la irradiación de alimentos (Ji & An, 2020). La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha concluido que la exposición de alimentos a radiación ionizante de potencia inferior es de 0,4 a 10 kGy no presenta riesgos toxicológicos, nutricionales ni microbianos (Ihsanullah & Rashid, 2017). En la **Tabla 5** se describe la aplicación de irradiación en diversos alimentos, detallando los parámetros y efectos relevantes encontrados.

2.6 Diodos emisores de luz

La tecnología de diodos emisores de luz (LED) constituye un innovador método no térmico de conservación de alimentos al convertir la energía lumínica en calor. Los LED son dispositivos de iluminación de estado sólido con propiedades singulares, tales como alta eficiencia fotoeléctrica, bajo poder térmico, compacidad y fácil integración en sistemas electrónicos (D'Souza et al., 2015). Estos dispositivos permiten manipular cómodamente las características espectrales, la intensidad radiante y la configuración temporal de la luz producida (Branas et al., 2013).

Tabla 5

Efecto de la aplicación de irradiación sobre compuestos bioactivos en alimentos

Muestra	Parámetros	Efectos relevantes	Referencia
Harina de cáscara de pitaya roja	Fuente de irradiación: cobalto-60 (60Co); irradiación: 1, 2, 3 y 4 kGy; dosis: 0,356 kGy/hora.	La vitamina C, contenido total de polifenoles y actividad antioxidante por DPPH y ABTS aumentaron significativamente en un 137,14%, 31,29%, 393,95% y 96,07%, respectivamente.	Santos et al. (2022)
Cáscara verde de pistacho	Irradiación: 0, 10, 20, 30 y 40 kGy; dosis: 3.05 Gy/s	El contenido total de polifenoles aumentó significativamente en un 8,78%.	Abolhasani et al. (2018)
Arroz integral	Fuente de irradiación: cobalto-60 (60Co); irradiación: 0, 2, 4, 6, 8, y 10 kGy; dosis: 2 kGy/hora	El contenido total de polifenoles y los β -carotenos aumentaron en un 41,75% y 46,91%, respectivamente.	Jan et al. (2020)
Azufaifo	Irradiación: 0, 0,5, 1, 2,5 y 5 kGy; dosis: 3.63 Gy/s; temperatura: 40 \pm 2 $^{\circ}$ C.	El contenido total de polifenoles y el contenido total de antocianinas monoméricas aumentaron en un 5,74% y 14,11%, respectivamente.	Najafabadi et al. (2017)
Spirulina	Fuente de irradiación: cobalto-60 (60Co); irradiación: 0, 0,5, 1, 1,5, 2 y 2,5 kGy; dosis: 1,02 kGy/h	El contenido total de polifenoles aumentó casi el doble en comparación con el control.	Shabana et al. (2017)

La tecnología LED utiliza energía luminosa con longitudes de onda entre 200 y 780 nm, subdividiendo el espectro en violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo, siendo las longitudes de onda azul, verde y roja comúnmente empleadas en la industria alimentaria (D'Souza et al., 2015). En la **Figura 6** se muestra un equipo de diodos emisores de luz para alimentos.



Figura 6. Representación gráfica de la tecnología de diodos emisores de luz.

Además de no contener mercurio, los LED son seguros y su tamaño compacto facilita su incorporación en aplicaciones de procesamiento de alimentos existentes. Con un alto rendimiento, robustez y vida útil superior a 10,000 horas, los LED son económicamente rentables, lo que los convierte en una opción viable para desinfección eficaz y aplicaciones de crecimiento vegetal (Song et al., 2018).

Estudios han demostrado que los LED mejoran la calidad nutritiva y prolongan la vida útil de los alimentos, regulando la maduración de las frutas (Poonia et al., 2022). Además, la inactivación de bacterias, virus y hongos en el agua mediante tratamiento con LED ha sido ampliamente estudiada, demostrando eficacia antimicrobiana en sistemas alimentarios (Prasad et al., 2020). Este efecto antibacteriano se logra por inactivación fotodinámica, afectando a compuestos fotosen-

sibles en presencia de oxígeno y dañando el ADN, si bien la eficacia depende de la longitud de onda de la luz utilizada (Prasad et al., 2020).

La exposición a diferentes longitudes de onda de los LED puede inducir la síntesis de compuestos bioactivos y antioxidantes, mejorando la calidad nutricional de cultivos hortícolas. Asimismo, los LED aumentan el contenido de nutrientes, alteran la maduración de frutas y verduras postcosecha, ofreciendo productos agronómicos beneficiosos para la salud humana gracias a su valor nutritivo y propiedades antioxidantes (Hasan et al., 2017). En la **Tabla 6** se describe la aplicación de diodos emisores de luz en diversos alimentos, detallando el tipo de alimento, los parámetros y los efectos más puntuales.

2.7. Luz pulsada

La tecnología luz pulsada (PL) consiste básicamente en la emisión de pulsos de radiación electromagnética (luz) de alta potencia y corta duración desde una lámpara de destello de gas inerte, que provoca el deterioro de las células microbianas mediante mecanismos fototérmicos, fotoquímicos y foto-físicos (Franco-Vega et al., 2021). En cuanto a la dependencia de la potencia máxima, generalmente se afirma que cuanto más corta es la duración del pulso, mayor es la liberación de energía y mayor es el efecto bactericida (Mandal et al., 2020).

PL tiene un gran potencial para mejorar la calidad de conservación de los productos alimenticios destruyendo microorganismos unos pocos segundos (Pollock et al., 2017). Sin embargo, la tecnología PL tiene sus limitaciones para su uso en aplicaciones alimentarias debido a la opacidad de los productos alimenticios y sus superficies no uniformes, y al posible aumento de temperatura (debido a los efectos de la región infrarroja) que conduce al deterioro de las cualidades organolépticas (Obileke et al., 2022).

Tabla 6

Efecto de la aplicación de diodos emisores de luz sobre compuestos bioactivos en alimentos

Muestra	Parámetros	Efectos relevantes	Referencia
Pimiento rojo	Longitud de onda: 590 nm; color: LED amarilla; flujo radian: 0,14 W; irradiancia media: 1,81 W/m ² ; tiempo: 7 días; temperatura: 10 °C	El contenido fenólico total, α -carotenoide y β -carotenoide aumentaron significativamente en un 31,67%, 11,65% y 31,20%, respectivamente.	Kokalj et al. (2016)
Tomate	Intensidad luminosa: 25,4 μ mol/m ² /s; color: LED rojo-azul; Flujo radian: 0,14 W; tiempo: 7 días; temperatura: 6 °C	El contenido total de polifenoles y total de carotenoides aumentaron significativamente en un 15,54% y 396,93%, respectivamente.	Baenas et al. (2021)
Brócoli	Longitud de onda: 520 nm; color: LED verde; intensidad luminosa: 12-13 μ mol/m ² /s; temperatura: 20 \pm 2 °C.	El contenido total de polifenoles y actividad antioxidante por DPPH aumentaron significativamente en un 40,4% y 12,5%, respectivamente.	Jin et al. (2015)
Brote de zanahoria	Longitud de onda: azul - 430 nm, Rojo - 660 y rojo lejano - 730 nm; Intensidad luminosa: 173 y 197 μ mol/m ² /s	El contenido total de polifenoles y actividad antioxidante por DPPH y ABTS aumentaron en un 45% - 65%, 53,7% - 65,1% y 36,2% - 33,8%, respectivamente.	Martínez-Zamora et al. (2021)
Brotos de col rizada	Longitud de onda: blanco 440-660 nm, rojo 660 y azul 470 nm; Intensidad luminosa: 30 μ mol/m ² /s	El contenido total de polifenoles aumentó en un 34,55% - 69,09%.	Qian et al. (2016)

La PL no es más que luz blanca ordinaria como la luz solar, excepto que tiene una intensidad muy alta y se aplica durante un período de tiempo muy corto. PL tiene un espectro electromagnético similar al de la luz solar, que va desde longitudes de onda ultravioleta (UV) hasta infrarrojo cercano (IR) (Gómez-López et al., 2012). La generación de pulsos de luz se lleva a cabo mediante la excitación de gases inertes, como el xenón en las lámparas de destello, y la colisión de moléculas gaseosas debido a la aplicación de pulsos eléctricos. Luego, la energía luminosa se libera en forma de ráfagas de luz de corta duración de manera altamente concentrada (que duran unos pocos cientos de microsegundos, generalmente de 1 μ s a 0,1 s) (Abida et al., 2014). Esta fuente de luz de xenón emite un destello de luz de amplio espectro, normalmente en el rango de aproximadamente entre 200 y 1100 nm con aproximadamente un 25% en el rango UV (Kramer et al., 2017).

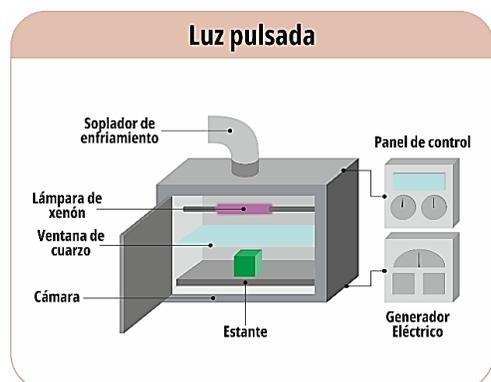


Figura 7. Representación gráfica de la tecnología de luz pulsada.

Los tipos de lámparas utilizados comprenden tubos de diversos materiales, como cuarzo y formas (por ejemplo, esféricas, espirales) y están llenos casi exclusivamente de gas xenón o, alternativamente, criptón o una mezcla de gases nobles (Heinrich et

al., 2016). En la Figura 7 se muestra un equipo de luz pulsada aplicado en alimentos.

La aplicación de luz pulsada proporciona una calidad mejorada del producto alimenticio que el procesamiento térmico, bajo costo operativo, proporciona flexibilidad y ausencia de residuos químicos y bioquímicos (Bulbul et al., 2019). En la Tabla 7 se describe la aplicación de luz pulsada en diversos alimentos, detallando los parámetros y efectos relevantes encontrados.

2.8. Campos Magnéticos Oscilantes

Un campo magnético es un campo de fuerza que rodea los circuitos de corriente eléctrica. Este fenómeno también se puede encontrar en las proximidades de materiales ferromagnéticos (Zhao et al., 2017). El campo electromagnético se puede dividir en dos categorías: campo magnético estático y campo magnético oscilante. Los campos magnéticos estáticos son aquellos que no cambian en términos de intensidad o dirección con el tiempo, independientemente de las frecuencias altas y bajas de los campos alternos. Por otro lado, un campo magnético oscilante varía con el tiempo y rota azimutalmente alrededor del centro de la línea del campo magnético (Kaur & Kumar, 2019).

En la industria alimentaria, se ha implementado el concepto de congelación asistida por campo magnético oscilante. Este método implica la generación de un campo magnético alrededor del producto congelado, utilizando imanes permanentes o electroimanes. Esta tecnología tiene como objetivo alinear los espines nucleares y electrónicos de las moléculas de agua con la dirección del campo magnético, evitando la aglomeración y manteniendo las condiciones ultrabajas de temperatura. Esto acelera la velocidad de congelación, resultando en la formación de pequeños cristales de hielo sin dañar las membranas celulares (Kaur & Kumar, 2019).

Tabla 7 Efecto de la aplicación de luz pulsada sobre compuestos bioactivos en alimentos

Muestra	Parámetros	Efectos relevantes	Referencia
Tomate	Fluencias: 4, 6 y 8 J/mc ² ; lámpara: Xenón; distancia: 8,5 cm; longitud de onda: 180 - 1100 nm.	El contenido de compuestos fenólicos y licopeno aumentaron significativamente en un 4,3% y 26,1%, respectivamente.	Valdivia-Nájar et al. (2018)
Pimiento rojo	Fluencias: 4, 8, 12, 16 y 32 J/mc ² ; lámpara: Xenón; distancia: 7,58 cm; longitud de onda: 190 - 1100 nm; tiempo: 7 días.	El contenido fenólico, vitamina C y carotenoides aumentaron significativamente en un 19%, 36% y 7%, respectivamente.	Rybak et al. (2021)
Tomate	Fluencias: 10 J/mc ² ; lámpara: Xenón; distancia: 8,5 cm; longitud de onda: 180 - 1100 nm; tiempo: 7,5 ms.	El contenido total de carotenoide y licopeno aumentaron significativamente en un 31% y 35%, respectivamente.	González-Casado et al. (2022)
Jugo de morera	Fluencias: 14 J/mc ² ; lámpara: Xenón; distancia: 2,5 cm; tiempo: 2, 4 y 8 días; pulsos: 360 μ s; frecuencia: 3 Hz.	El contenido total de polifenoles y flavonoides aumentaron significativamente en un 0,32% y 0,28%, respectivamente.	Kwaw et al. (2018)
Tomate	Fluencias: 1, 2, 4 y 8 J/mc ² ; lámpara: Xenón; distancia: 12,46 cm	El contenido total de polifenoles y actividad antioxidante por DPPH aumentaron significativamente en un 1,88 - 31,57% y 1,09 - 56,64%, respectivamente.	Pataro et al. (2015)

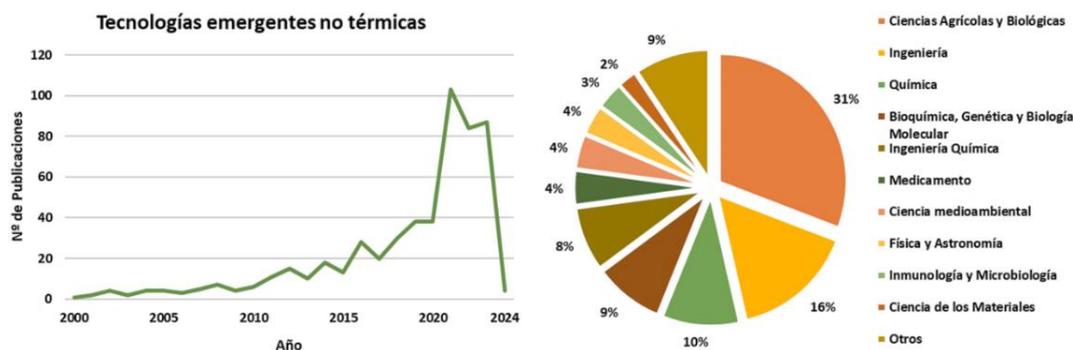


Figura 8. Número de publicaciones de artículos científicos desde 2000 hasta 2024 sobre las Tecnologías emergentes no térmicas. Información obtenida de la base de datos Scopus (criterios de búsqueda: KEYWORDS: "Emerging AND non-thermal AND technologies"; tipo de DOCUMENT TYPE: "ALL").

Es por ello que el uso de campos magnéticos oscilantes durante el proceso de congelación ha sido respaldado por algunos expertos. Su aplicación ha sido objeto de estudio en alimentos como la carne de cangrejo (Otero et al., 2017), la carne de cerdo (Rodríguez et al., 2017), la carne de res (Kang et al., 2020), la caballa (Okuda et al., 2020), el mango (Puza et al., 2019), el melón (Her et al., 2019), la piña (Kang et al., 2019), la manzana y la papa (Purnell et al., 2017). En general, los resultados no muestran ningún efecto estadísticamente significativo; sin embargo, se observaron efectos significativos en algunos ajustes para ciertos parámetros en algunos productos específicos. Esto puede sugerir que el OMF puede adaptarse a situaciones específicas. Así que se sugiere que el OMF puede no afectar a todos los alimentos por igual y que cualquier efecto depende de la interrelación entre el tipo de alimento, la velocidad de congelación, la frecuencia del campo magnético y las condiciones de almacenamiento (Kaur & Kumar, 2019).

3. Retos actuales y futuros

El cambio hacia estas tecnologías emergentes se atribuye a diversas razones, entre las cuales se incluye la capacidad para producir productos con atributos nutricionales, sensoriales y de seguridad

superiores a los procesos térmicos convencionales (Ojha et al., 2016). Además, promete mucho la amplia gama de combinaciones de diferentes tecnologías no térmicas, las cuales podrían ser un método prometedor para lograr mejores resultados y una mayor eficiencia. A pesar de las numerosas ventajas demostradas, su aplicación en la industria alimentaria ha sido limitada hasta la fecha, principalmente debido a la elevada inversión de capital y al rendimiento relativamente bajo, necesario para su integración en las líneas de producción existentes (Hernández-Hernández et al., 2019).

Las tecnologías no térmicas emergentes poseen un gran potencial para la producción de alimentos seguros y de alta calidad. En términos generales, estas técnicas de procesamiento pueden mitigar los efectos adversos del procesado convencional, especialmente en lo que respecta a los compuestos bioactivos presentes en verduras, frutas y sus derivados. Existe un creciente interés en estas tecnologías emergentes (Figura 8), destacándose en la eficiencia energética, la preservación del medio ambiente, el tiempo de procesamiento y la retención de propiedades nutricionales como sus principales ventajas de desarrollo (Khan et al., 2018). En la Tabla 8 se detallan las ventajas y limitaciones de cada una de las tecnologías en esta revisión.

Tabla 8
Ventajas y limitaciones de las tecnologías emergentes no térmicas

Tecnología	Ventajas	Limitaciones	Referencia
Campos eléctrico pulsado	<p>Puede mejorar o reemplazar métodos convencionales de procesamiento de alimentos, preservando la calidad sensorial y nutricional al evitar altas temperaturas y largos tiempos de procesamiento.</p> <p>Permite procesar una amplia variedad de alimentos, inactivando microorganismos, extrayendo componentes activos y modificando biomacromoléculas.</p>	<p>La tecnología está en desarrollo y requiere esfuerzos continuos de investigación para superar desafíos en la construcción de sistemas a mayor escala.</p> <p>Depende de varios parámetros del proceso, como la intensidad del campo eléctrico, tiempo de tratamiento, energía específica, forma del pulso, ancho del pulso, frecuencia y temperatura.</p> <p>Cada tipo de alimento puede requerir ajustes específicos de parámetros para lograr los</p>	<p>Niu et al. (2020); Arshad et al. (2020); Zhang et al. (2023)</p>

	<p>Destaca por su eficiencia en el uso de energía, manteniendo bajas las temperaturas de los alimentos tratados y asegurando la calidad y seguridad alimentaria</p> <p>Mejora la eficiencia y el rendimiento en procesos de extracción</p>	<p>mejores resultados, lo que puede complicar su aplicación universal.</p> <p>Presenta limitaciones en productos con alta conductividad eléctrica.</p> <p>La formación de poros en la membrana celular puede llevar a la electroporación irreversible, resultando en la muerte celular.</p> <p>La variabilidad en la resistividad eléctrica de los alimentos sólidos puede conducir a áreas tratadas de manera desigual.</p>	
Ultrasonido	<p>Reducción de las pérdidas de productos.</p> <p>Eficacia contra células vegetativas, esporas y enzimas.</p> <p>Reducción de temperaturas y tiempos de proceso.</p> <p>Aumento de la transferencia de calor.</p> <p>Modificación de la estructura y textura del producto.</p> <p>Alta eficiencia y bajo consumo de energía.</p> <p>Funcionamiento por lotes o continuo.</p> <p>Mejora de la transferencia de calor y calidad organoléptica.</p> <p>Realza el color y reduce la pérdida de componentes volátiles.</p> <p>Aumento de la velocidad de procesamiento en diversos procesos industriales.</p>	<p>La profundidad de penetración se ve afectada por los sólidos y el aire del producto.</p> <p>Posible daño debido a los radicales libres.</p> <p>Modificación no deseada de la estructura y textura de los alimentos.</p> <p>Necesidad de combinarse con otros procesos, como el calentamiento.</p> <p>Potencial de provocar degradación de compuestos fenólicos y vitaminas, así como cambios de color y pérdida de antocianinas.</p> <p>Necesidad de diseño especial para diferentes materiales alimentarios.</p>	<p>Pérez-Andrés et al. (2018); Yuan et al. (2021); Singla & Sit (2021)</p>
Plasma frío	<p>Alta eficiencia de inactivación microbiana a bajas temperaturas (<50 °C), prolongando la vida útil de los alimentos.</p> <p>Compatible con la mayoría de los envases y atmósferas modificadas existentes.</p> <p>La especie química activa del plasma tiene alta difusividad y acción rápida, accediendo a toda la superficie del alimento.</p> <p>En general, impacta de manera insignificante en la matriz del producto, reduciendo así el uso de conservantes.</p> <p>Ausencia de productos químicos y altas temperaturas</p> <p>Inactiva varios microorganismos productores de micotoxinas, manteniendo una buena calidad de retención de las propiedades de los alimentos.</p>	<p>Dificultad para controlar con precisión la química de las reacciones del plasma gaseoso.</p> <p>El proceso puede resultar costoso si se opera con gases nobles.</p> <p>Posible producción de gases nocivos.</p> <p>Requiere medidas de seguridad adicionales cuando la generación de plasma se realiza con tensiones muy altas.</p> <p>Posible alteración en las características de color de los productos.</p> <p>Dificultad con alimentos voluminosos y de forma irregular.</p> <p>Disminución de la capacidad de retención de humedad en algunos alimentos.</p> <p>Aumento de la producción de productos de oxidación primaria, haciendo que los lípidos sean más vulnerables a la oxidación.</p>	<p>Coutinho et al. (2018); Ucar et al. (2021); Feroz et al. (2019); Gavahian & Cullen (2019)</p>
Alta presión	<p>No rompe los enlaces covalentes, por lo que el desarrollo de sabores ajenos a los productos se evita, manteniendo el sabor natural de los productos.</p> <p>Inactiva microorganismos, bacterias, virus e insectos en los alimentos.</p> <p>Reducción de los tiempos de procesamiento.</p> <p>Uniformidad del tratamiento en todo el alimento.</p> <p>Posibilidad de cambios de textura deseables.</p> <p>Posibilidad de procesamiento envasado.</p> <p>Posibilidad de reducir o eliminar los conservantes químicos.</p> <p>No depende del tiempo/masa, por lo que actúa instantáneamente, reduciendo así el tiempo de procesado.</p> <p>Puede aplicarse a temperatura ambiente, lo que reduce la cantidad de energía y no genera residuos.</p>	<p>Poco efecto sobre la actividad enzimática de los alimentos.</p> <p>Los alimentos deben tener aproximadamente un 40% de agua libre para obtener un efecto antimicrobiano.</p> <p>Procesamiento por lotes.</p> <p>Opciones de envasado limitadas.</p> <p>Las enzimas alimentarias y las esporas bacterianas son muy resistentes a la presión y requieren presiones muy altas para su inactivación.</p> <p>El coste inicial de la implementación de los sistemas puede seguir siendo una consideración para algunas aplicaciones.</p>	<p>Abera (2019); Naveena & Nagaraju (2020)</p>
Irradiación	<p>Excelente penetración en los alimentos</p> <p>Permitido en varios países</p> <p>Poca pérdida de calidad de los alimentos</p>	<p>Existe una percepción negativa entre algunos consumidores que consideran que los alimentos irradiados pueden representar un riesgo para la salud.</p>	<p>Ravindran & Jaiswal (2019); Pi et al. (2022); Huang et al. (2019)</p>

	<p>Adecuado para la producción a gran escala Bajo coste energético Inactiva microorganismos, bacterias, virus e insectos en los alimentos. La irradiación de alimentos puede reducir la alergenicidad sin causar cambios drásticos en la calidad nutricional. Reducción de componentes antinutricionales en alimentos. La irradiación de alimentos ha sido respaldada por organizaciones internacionales como la OMS, la OIEA y la FAO.</p>	<p>Puede causar cambios en la composición de los alimentos, como la reducción de vitaminas o la alteración de los ácidos grasos. Dosis más altas de irradiación pueden afectar las propiedades sensoriales de los alimentos, como el sabor, el olor y la textura. Los equipos necesarios pueden tener costos iniciales y operativos significativos. Aunque es efectiva en muchos casos, la irradiación puede no ser la opción más adecuada para todos los tipos de alimentos.</p>
<p>Diodos emisores de luz</p>	<p>Funcionan con mayor eficacia luminosa a temperaturas más bajas. Altas propiedades organolépticas frescas, aplicables a alimentos refrigerados como frutas, verduras y productos lácteos, proporcionando una imagen natural. Inactivación eficaz de microorganismos, reduciendo el riesgo de enfermedades transmitidas por los alimentos. Pueden prolongar la vida útil de los productos al inhibir el crecimiento de microorganismos de deterioro. Su mantenimiento es sencillo Pueden reducir significativamente el costo Proceso de desinfección sin productos químicos, lo que los convierte en una opción más respetuosa con el medio ambiente y los consumidores. Suelen consumir menos energía que las lámparas UV tradicionales. No requieren tiempo de calentamiento, permitiendo su uso inmediato y reduciendo el consumo de energía. No contienen mercurio, eliminando el riesgo de contaminación por residuos de mercurio en los alimentos procesados.</p>	<p>Se requieren tres LEDs para lograr la iluminación de una bombilla tradicional. Son más caros que las bombillas convencionales. Costo de reparación alto, ya que se debe reemplazar la pieza completa. Afectan negativamente las propiedades organolépticas, como sabor y olor desagradables, a altas concentraciones. La eficacia depende de longitudes de onda de luz específicas. Tiene una capacidad de penetración limitada, lo que significa que puede no alcanzar toda la profundidad de ciertos alimentos. Puede verse influenciada por parámetros intrínsecos como el coeficiente de absorción de la matriz alimentaria. El coste inicial de la implementación de los sistemas UV-LED puede seguir siendo una consideración para algunas aplicaciones. Algunos estudios mencionan tiempos de tratamiento prolongados, lo que podría limitar la viabilidad comercial de la tecnología.</p>
<p>Luz pulsada</p>	<p>Desinfección rápida de superficies, materiales y alimentos en aplicaciones industriales. Efectiva en la reducción de carga microbiana en alimentos, contribuyendo a la seguridad alimentaria. Procesamiento rápidos y alta eficiencia en la inactivación microbiana. Amplio Espectro de Aplicación con un espectro que abarca infrarrojo, luz visible y ultravioleta, es versátil para diversas aplicaciones y tipos de productos. Permite el procesamiento de productos frescos mientras mantiene las cualidades sensoriales. No deja residuos químicos perjudiciales para los humanos. Puede combinar con otros métodos de desinfección mejorando su eficacia y versatilidad.</p>	<p>La eficacia está vinculada a condiciones como la fuente de luz UV, número de pulsos y tipo de microorganismo. Algunas cepas pueden mostrar resistencia, afectando la eficacia de la técnica. La composición de las superficies puede afectar la eficacia, especialmente por factores como la rugosidad y porosidad. Se requiere una optimización cuidadosa de factores como la fluencia de luz, distancia y tiempo de tratamiento para resultados óptimos. Los tratamientos con altas fluencias o un gran número de pulsos pueden provocar el sobrecalentamiento de las muestras, afectando el contenido nutricional, el color y las propiedades sensoriales. Las lámparas de xenón tienen una vida útil relativamente corta.</p>
<p>Campos magnéticos pulsados</p>	<p>Mejora el superenfriamiento del agua, lo que puede tener beneficios en la formación de cristales de hielo más pequeños. Inhiben la cristalización del hielo, lo que podría contribuir a la reducción de daños en los alimentos congelados. Aceleran la transferencia de calor durante el proceso de congelamiento.</p>	<p>Los mecanismos presentados en las patentes para explicar los efectos de los OMFs en las moléculas de agua son vagos y no han sido científicamente demostrados. Algunos estudios han arrojado resultados contradictorios. Algunos no han encontrado efectos significativos de los OMFs en la calidad de los alimentos congelados, mientras que otros han afirmado mejoras.</p>

Hyun & Lee (2020);
Hinds et al. (2019);
Prasad et al. (2020)

Mahendran et al. (2019); Pirozzi et al. (2021); Vargas-Ramella et al. (2021).

Otero et al. (2017);
Puza et al. (2019).

<p>Preserva la firmeza de los alimentos, evitando la pérdida de textura asociada al congelamiento convencional. Reduce la pérdida por goteo causada por el estrés mecánico durante la formación de hielo.</p>	<p>La falta de información detallada sobre los campos magnéticos aplicados, como la presencia de campos magnéticos estáticos u oscilantes, valores de fuerza y frecuencia, dificulta la comparación y evaluación de los resultados de diferentes estudios. La variabilidad inherente en los productos alimenticios (tamaño, forma, estructura, composición) y las condiciones experimentales puede dificultar la atribución precisa de mejoras de calidad</p>
---	---

Por otro lado, utilizando representaciones gráficas es viable detectar las lagunas en el conocimiento o áreas que requieren una mayor exploración en este tema. El volumen de los nodos, combinado con la ubicación central y periférica de estos, posibilita la observación de las conexiones entre un concepto y otros. En la **Figura 9** se observa la co-ocurrencia de las palabras clave de los artículos analizados. En la **Figura 9(a)** se identifican cuatro clústeres:

Clúster rojo: relacionado con las tecnologías no térmicas con aplicación principal a jugos de frutas (Campos eléctricos pulsados, alta presión hidrostática, luz pulsada y radiación ultravioleta).

Clúster amarillo: relacionado con la tecnología de alta presión aplicada a la inactivación microbiana con aplicación principal a carnes.

Clúster verde: relacionado con las tecnologías no térmicas con aplicación a la industria de alimentos para humanos y animales (irradiación y ultrasonido).

Clúster azul: relacionado con las tecnologías no térmicas con uso de plasma y ozono.

En la **Figura 9(b)** se identifican los temas, desde los más antiguos hasta los más recientes. Se observa

que las tecnologías de campos eléctricos pulsados y alta presión hidrostática son los de interés más antiguo. Luego, está la tecnología de irradiación y después las tecnologías de ultrasonido y luz pulsada. Más recientemente el interés se centra en las tecnologías de ozono y plasma, como por ejemplo el uso de plasma frío, existiendo una gran preocupación por los efectos en los compuestos bioactivos y antioxidantes.

Se espera un crecimiento constante en las aplicaciones de estas nuevas tecnologías, impulsado por las crecientes reformas gubernamentales de algunos países que favorecen el uso de tecnologías verdes y eficientes (Singla & Sit, 2021). Además, se sugiere llevar a cabo investigaciones más exhaustivas sobre los efectos de estas tecnologías en los alimentos, enfocándose en aspectos como la bioaccesibilidad y bioactividad de los compuestos, el valor nutricional, la vida útil, los aspectos sensoriales y los parámetros necesarios para obtener resultados prometedores, teniendo en cuenta el tipo de muestra o producto a tratar.

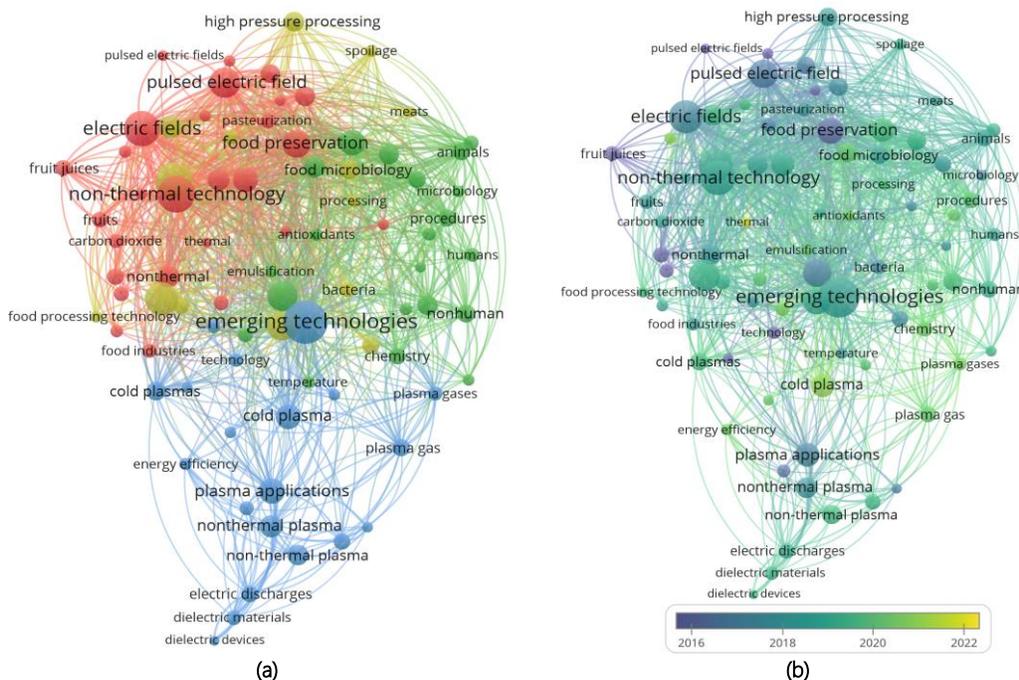


Figura 9. Análisis de co-ocurrencia de palabras clave. (a) Visualización de redes y clústeres; (b) Visualización de superposición en el tiempo. La data se obtuvo de Scopus (criterios de búsqueda: KEYWORDS: "Emerging AND non-thermal AND technologies"; tipo de DOCUMENT TYPE: "ALL"; Período: 2000 a 2024) y utilizando VosViewer (<https://www.vosviewer.com/>).

Por último, en el caso particular de los campos magnéticos oscilantes, se requiere mayor investigación con el fin de aclarar y confirmar los efectos que promete dicha tecnología, así como descubrir otros posibles efectos o aplicaciones, ya que la tecnología presenta resultados contradictorios que no aclaran si tiene efectos significativos en las muestras tratadas hasta la fecha publicada.

4. Conclusiones

Las tecnologías emergentes no térmicas ofrecen soluciones sofisticadas, ya que la industria alimentaria busca nuevas alternativas para enfrentar los desafíos de una competencia más intensa, la globalización y las crecientes demandas de los consumidores. Tecnologías como campos eléctricos pulsados, ultrasonido, plasma frío, alta presión, irradiación, diodos emisores de luz, luz pulsada y campos magnéticos oscilantes han demostrado su potencial en la industrialización de alimentos. Estas innovadoras tecnologías no solo brindan oportunidades para el desarrollo de nuevos productos, sino que, mediante un procesamiento menos agresivo, mejoran la calidad y preservan eficientemente los compuestos bioactivos de los alimentos convencionales. Además, es importante destacar que tienen el potencial de reducir el consumo de energía, a diferencia de los tratamientos térmicos convencionales, lo que, a su vez, puede contribuir a disminuir la huella de carbono generada por el procesamiento de alimentos, avanzando así hacia la sostenibilidad ambiental.

Existe gran cantidad de estudios respecto al tema, aun así, se requiere mayor investigación para optimizar y mejorar la eficiencia de la aplicación de estas tecnologías, solas o en combinación, entre ellas o con tecnologías convencionales, en el procesamiento de alimentos. Variables de interés pueden ser la bioaccesibilidad y bioactividad de los compuestos, el valor nutricional, la vida útil y los aspectos sensoriales.

ORCID

L. M. Paucar-Menacho  <https://orcid.org/0000-0001-5349-6167>

C. Moreno-Rojas  <https://orcid.org/0000-0002-7143-4450>

S. R. Chuqui-Diestra  <https://orcid.org/0000-0003-2582-2716>

Referencias bibliográficas

Aadil, R. M., Zeng, X.-A., Han, Z., Sahar, A., Khalil, A. A., Rahman, U. U., Khan, M., & Mehmood, T. (2017). Combined effects of pulsed electric field and ultrasound on bioactive compounds and microbial quality of grapefruit juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(2), e13507. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13507>

Abera, G. (2019). Review on high-pressure processing of foods. *Cogent Food and Agriculture*, 5(1) 1568725. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1568725>

Abida, J., Rayees, B., & Masoodi, F. A. (2014). Pulsed light technology: a novel method for food preservation. *International Food Research Journal*, 21(3), 839.

Abolhasani, A., Barzegar, M., & Sahari, M. A. (2018). Effect of gamma irradiation on the extraction yield, antioxidant, and antityrosinase activities of pistachio green hull extract. *Radiation Physics and Chemistry*, 144, 373-378. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.09.025>

Al-Juhaimi, F., Ghafoor, K., Musa, M., Zcan, O. T., Jahurul, M. H. A., Elfadil, Babiker, E., Jinap, S., Sahena, F., Sharifudin, M. S., & Zaidul, I. S. M. (2018). Effect of various food processing and handling methods on preservation of natural antioxidants in fruits and vegetables. *Journal of Food Science and Technology*, 50(10), 3872-3880. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3370-0>

Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Munir, A., Buntat, Z., Ahmad, M. H., Jusoh, Y. M., Bekhit, A. E., Roobad, U., Manzoor, M. F., & Aadil, R. M. (2020). Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective. *Trends in food science & technology*, 104, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.008>

Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Roobad, U., Munir, M. A., Naderipour, A., Qureshi, M. I., Bekhit, A., Liu, Z., & Aadil, R. M. (2021). Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.041>

Augusto, P. E. (2020). Challenges, trends and opportunities in food processing. *Current Opinion in Food Science*, 35, 72-78. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.005>

Baenas, N., Iniesta, C., González-Barrio, R., Nuñez-Gómez, V., Periago, M., García-Alonso, F. (2021). Uso poscosecha de luz ultravioleta (UV) y diodo emisor de luz (LED) para mejorar los compuestos bioactivos en tomates refrigerados. *Molecules*, 26(7), 1847. <https://doi.org/10.3390/molecules26071847>

Balasubramaniam, V. M., Martínez-Monteagudo, S. I., & Gupta, R. (2015). Principles and application of high pressure-based technologies in the food industry. *Annual review of food science and technology*, 6, 435-462. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022814-015539>

Bevilacqua, A., Petrucci, L., Perricone, M., Speranza, B., Campaniello, D., Sinigaglia, M., & Corbo, M. R. (2018). Nonthermal technologies for fruit and vegetable juices and beverages: overview and advances. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(1), 2- 62. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12299>.

Blahovec, J., Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2017). Pulsed electric fields pretreatments for the cooking of foods. *Food engineering reviews*, 9, 226-236. <https://doi.org/10.1007/s12393-017-9170-x>

Branas C, Azcondo FJ, Alonso JM. (2013). Solid-state lighting: a system review. *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, 7(4), 6-14. <https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2280038>.

Buchmann, L., Bloch, R., & Mathys, A. (2018). Comprehensive pulsed electric field (PEF) system analysis for microalgae processing. *Bioresource technology*, 265, 268-274. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.010>

Bulbul, V. J., Bhushette, P. R., Zambare, R. S., Deshmukh, R. R., & Annapure, U. S. (2019). Effect of cold plasma treatment on Xanthan gum properties. *Polymer Testing*, 79, 106056. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106056>

Carrillo-Lopez, L. M., Garcia-Galicia, I. A., Tirado-Gallegos, J. M., Sanchez-Vega, R., Huerta-Jimenez, M., Ashokkumar, M., & Alarcon-Rojas, A. D. (2021). Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105467. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105467>

Chakka, A. K., Sriraksha, M. S., & Ravishankar, C. N. (2021). Sustainability of emerging green non-thermal technologies in

- the food industry with food safety perspective: A review. *Lwt*, 151, 112140. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112140>
- Chantakun, K., & Benjakul, S. (2022). Characteristics and qualities of edible bird's nest beverage as affected by thermal pasteurization and sterilization. *Journal of Food Science and Technology*, 59(10), 4056-4066. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05455-8>
- Chávez-Martínez, A., Reyes-Villagrana, R. A., Rentería-Monterrubio, A. L., Sánchez-Vega, R., Tirado-Gallegos, J. M., & Bolívar-Jacobo, N. A. (2020). Low and high-intensity ultrasound in dairy products: applications and effects on physicochemical and microbiological quality. *Foods*, 9(11), 1688. <https://doi.org/10.3390/foods9111688>
- Chen, F., Zhang, M., & Yang, C. H. (2020). Application of ultrasound technology in processing of ready-to-eat fresh food: A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 63, 104953. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104953>
- Chen, H. H., Chang, H. C., Chen, Y. K., Hung, C. L., Lin, S. Y., & Chen, Y. S. (2016). An improved process for high nutrition of germinated brown rice production: Low-pressure plasma. *Food Chemistry*, 191, 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.083>
- 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. *Trends in Food Science and Technology*, 74, 56-68. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.008>
- D'Souza, C., Yuk, H.-G., Khoo, G. H., & Zhou, W. (2015). Application of Light-Emitting Diodes in Food Production, Postharvest Preservation, and Microbiological Food Safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(6), 719-740. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12155>
- Dadi, D. W., Emire, S. A., Hagos, A. D., & Eun, J. B. (2019). Effect of ultrasound-assisted extraction of Moringa stenopetala leaves on bioactive compounds and their antioxidant activity. *Food Technology and Biotechnology*, 57(1), 77. <https://doi.org/10.17113/ftb.57.01.19.5877>
- Daher, D., Le Gourrierec, S., & Pérez-Lamela, C. (2017). Effect of High-Pressure Processing on the Microbial Inactivation in Fruit Preparations and Other Vegetable Based Beverages. *Agriculture*, 7(9), 72. <https://doi.org/10.3390/agriculture7090072>
- de Jesus, A. L. T., Cristianini, M., Dos Santos, N. M., & Júnior, M. R. M. (2020). Effects of high hydrostatic pressure on the microbial inactivation and extraction of bioactive compounds from açai (*Euterpe oleracea Martius*) pulp. *Food research international*, 130, 108856. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108856>
- de Souza Carvalho, L. M., Lemos, M. C. M., Sanches, E. A., da Silva, L. S., de Araújo Bezerra, J., Aguiar, J. P. L., Souza, F. C., Filho, E. G., & Campelo, P. H. (2020). Improvement of the bioaccessibility of bioactive compounds from Amazon fruits treated using high energy ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 67, 105148. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105148>
- do Amaral Souza, F. D. C., Moura, L. G. S., de Oliveira Bezerra, K., Aguiar, J. P. L., Mar, J. M., Sanches, E. A., Dos Santos, F., Bakry, A., Paulino, B., & Campelo, P. H. (2019). Thermo-sonication applied on camu-camu nectars processing: Effect on bioactive compounds and quality parameters. *Food and Bioproducts Processing*, 116, 212-218. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.06.003>
- do Nascimento, C., Santos, B. N., & Rodrigues, S. (2022). High-intensity ultrasound processed acerola juice containing oligosaccharides and dextran promotes *Lactocaseibacillus casei* NRRL B-442 growth. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(8), 5186-5194. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15829>
- Ekonomou, S. I., Bulut, S., Karatzas, K. A. G., & Boziaris, I. S. (2020). Inactivation of *Listeria monocytogenes* in raw and hot smoked trout fillets by high hydrostatic pressure processing combined with liquid smoke and freezing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 102427. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102427>
- Fan, L., Liu, X., Ma, Y., & Xiang, Q. (2020). Effects of plasma-activated water treatment on seed germination and growth of mung bean sprouts. *Journal of Taibah University for Science*, 14(1), 823-830. <https://doi.org/10.1080/16583655.2020.1778326>
- Feroz, F., Nafisa, S., & Noor, R. (2019). Emerging technologies for food safety: high pressure processing (HPP) and cold plasma technology (CPT) for decontamination of foods. *Bangladesh Journal of Microbiology*, 36(1), 35-43. <https://doi.org/10.3329/bjbm.v36i1.44281>
- Figueroa-Sepúlveda, K., Castillo-Robles, N., & Martínez-Girón, J. (2021). Aplicación de altas presiones y otras tecnologías en frutas como alternativa de tratamientos térmicos convencionales. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(2), 271-285. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1772>
- Franco-Vega, A., Reyes-Jurado, F., González-Albarrán, D., Ramírez-Corona, N., Palou, E., & López-Malo, A. (2021). Developments and advances of high intensity pulsed light and its combination with other treatments for microbial inactivation in food products. *Food Engineering Reviews*, 13, 741-768. <https://doi.org/10.1007/s12393-021-09280-1>
- Gabrić, D., Barba, F., Roohinejad, S., Gharibzadeh, S. M. T., Radojčin, M., Putnik, P., & Bursać Kovačević, D. (2017). Pulsed electric fields as an alternative to thermal processing for preservation of nutritive and physicochemical properties of beverages: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 41(1), e12638. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12638>
- Gagneten, M., Leiva, G., Salvatori, D., Schebor, C., & Olaiz, N. (2019). Optimization of pulsed electric field treatment for the extraction of bioactive compounds from blackcurrant. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1102-1109. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02283-1>
- Gavahian, M., & Cullen, P. J. (2019). Cold Plasma as an Emerging Technique for Mycotoxin-Free Food: Efficacy, Mechanisms, and Trends. *Food Reviews International*, 36(2), 193-214. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1630638>
- Gómez-López, V. M., Koutchma, T., & Linden, K. (2012). *Ultraviolet and pulsed light processing of fluid foods. In Novel thermal and non-thermal technologies for fluid foods* (pp. 185-223). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381470-8.00008-6>
- González-Casado, S., López-Gámez, G., Martín-Belloso, O., Elez-Martínez, P., & Soliva-Fortuny, R. (2022). Pulsed light of near-infrared and visible light wavelengths induces the accumulation of carotenoids in tomato fruits during post-treatment time. *Journal of Food Science*, 87(9), 3913-3924. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16270>
- Guillén Sánchez, J. S., Betim Cazarin, C. B., Regina Canesin, M., Reyes, F. G. R., Hoshi Iglesias, A., & Cristianini, M. (2023). Extraction of bioactive compounds from Peruvian purple corn cob by high isostatic pressure. *Scientia Agropecuaria*, 14(1), 49-57. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.005>
- Guimarães, J. T., Silva, E. K., Alvarenga, V. O., Costa, A. L. R., Cunha, R. L., Sant'Ana, A. S., ... & Cruz, A. G. (2018). Physicochemical changes and microbial inactivation after high-intensity ultrasound processing of prebiotic whey beverage applying different ultrasonic power levels. *Ultrasonics sonochemistry*, 44, 251-260. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.012>
- Handayani, M., & Permawati, H. (2017). Gamma irradiation technology to preservation of foodstuffs as an effort to maintain quality and acquaint the significant role of nuclear on food production to Indonesia society: A Review. *Energy*

- Procedia*, 127, 302-309. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.112>
- Hasan, Dr- M., Bashir, T., Ghosh, R., Lee, S., & Bae, H. (2017). An Overview of LEDs' Effects on the Production of Bioactive Compounds and Crop Quality. *Molecules*, 22(9), 1420. <https://doi.org/10.3390/molecules22091420>
- Heinrich V, Zunabovic M, Varzakas T, Bergmair J, Kneifel W (2016) Pulsed light treatment of different food types with a special focus on meat: a critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56, 591-613. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.826174>
- Her, J. Y., Kang, T., Hoptowitz, R., & Jun, S. (2019). Oscillating magnetic field (OMF) based supercooling preservation of fresh-cut honeydew melon. *Transactions of the ASABE*, 62(3), 779-785. <https://doi.org/10.13031/trans.13286>
- Herceg, Z., Kovačević, D. B., Kljurić, J. G., Jambrak, A. R., Zorić, Z., & Dragović-Uzelac, V. (2016). Gas phase plasma impact on phenolic compounds in pomegranate juice. *Food Chemistry*, 190, 665-672. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.135>
- Hernández-Hernández, H. M., Moreno-Vilet, L., & Villanueva-Rodríguez, S. J. (2019). Current status of emerging food processing technologies in Latin America: Novel non-thermal processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 58, 102233. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102233>
- Hinds, L. M., O'Donnell, C. P., Akhter, M., & Tiwari, B. K. (2019). Principles and mechanisms of ultraviolet light emitting diode technology for food industry applications. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 56, 102153. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.04.006>
- Hu, K., Peng, D., Wang, L., Liu, H., Xie, B., & Sun, Z. (2021). Effect of mild high hydrostatic pressure treatments on physiological and physicochemical characteristics and carotenoid biosynthesis in postharvest mango. *Postharvest Biology and Technology*, 172, 111381. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111381>
- Huang, H. W., Wu, S. J., Lu, J. K., Shyu, Y. T., & Wang, C. Y. (2017). Current status and future trends of high-pressure processing in food industry. *Food control*, 72, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.07.019>
- Huang, M., Zhang, M., & Bhandari, B. (2019). Recent development in the application of alternative sterilization technologies to prepared dishes: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(7), 1188-1196. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1421140>
- Hyun, J., & Lee, S. (2020). Blue light-emitting diodes as eco-friendly non-thermal technology in food preservation. *Trends in Food Science and Technology*, 105, 284-295. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.008>
- Ihsanullah, I., & Rashid, A. (2017). Current activities in food irradiation as a sanitary and phytosanitary treatment in the Asia and the Pacific Region and a comparison with advanced countries. *Food Control*, 72, 345-359. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.03.011>
- Indiarto, R., Pratama, A. W., Sari, T. I., & Theodora, H. C. (2020). Food irradiation technology: A review of the uses and their capabilities. *Int. J. Eng. Trends Technol*, 68(12), 91-98. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V68I12P216>
- Iqbal, A., Murtaza, A., Hu, W., Ahmad, I., Ahmed, A., & Xu, X. (2019). Activation and inactivation mechanisms of polyphenol oxidase during thermal and non-thermal methods of food processing. *Food and Bioprocess Processing*, 117, 170-182. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.07.006>
- Jadhav, H. B., Annature, U. S., & Deshmukh, R. R. (2021). Non-thermal technologies for food processing. *Frontiers in Nutrition*, 8, 657090. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.657090>
- Jan, A., Sood, M., Younis, K., & Islam, R. U. (2020). Brown rice based weaning food treated with gamma irradiation evaluated during storage. *Radiation Physics and Chemistry*, 177, 109158. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109158>
- Ji, A., & An, I. (2020). Irradiation: Utilization, Advances, Safety, Acceptance, Future Trends, and a Means to Enhance Food Security. *Advances in Applied Science Research*, 11(3). <https://doi.org/10.36648/0976-8610.11.3.1>
- Jin, P., Yao, D., Xu, F., Wang, H., & Zheng, Y. (2015). Effect of light on quality and bioactive compounds in postharvest broccoli florets. *Food chemistry*, 172, 705-709. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.134>
- Jurić, S., Ferrari, G., Velikov, K. P., & Donsi, F. (2019). High-pressure homogenization treatment to recover bioactive compounds from tomato peels. *Journal of Food Engineering*, 262, 170-180. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.06.011>
- Kang, T., Her, J. Y., Hoptowitz, R., Wall, M. M., & Jun, S. (2019). Investigation of the effect of oscillating magnetic field on fresh-cut pineapple and agar gel as a model food during supercooling preservation. *Transactions of the ASABE*, 62(5), 1155-1161. <https://doi.org/10.13031/trans.13285>
- Kang, T., Hoptowitz, R., & Jun, S. (2020). Effects of an oscillating magnetic field on ice nucleation in aqueous iron-oxide nanoparticle dispersions during supercooling and preservation of beef as a food application. *Journal of Food Process Engineering*, 43(11), e13525. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13525>
- Kart, D., Gurel, D. B., & Kayaardi, S. (2018). Cold plasma and ultrasound applications in cleaning of food contact surfaces. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 4(8), 17-27.
- Kaur, M., & Kumar, M. (2019). An Innovation in Magnetic Field Assisted Freezing of Perishable Fruits and Vegetables: A Review. *Food Reviews International*, 36(8), 761-780. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1683746>
- Khan, M. K., Ahmad, K., Hassan, S., Imran, M., Ahmad, N., & Xu, C. (2018). Effect of novel technologies on polyphenols during food processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 45, 361-381. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.12.006>
- Khouryieh, H. A. (2021). Novel and emerging technologies used by the US food processing industry. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 67, 102559. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102559>
- Kokalj, D., Hribar, J., Cigić, B., Zlatić, E., Demšar, L., Sinkovič, L., Šircelj, H., Bizjak, G., & Vidrih, R. (2016). Influence of Yellow Light-Emitting Diodes at 590 nm on Storage of Apple, Tomato and Bell Pepper Fruit. *Food Technol Biotechnol*. 54(2), 228-235. <https://doi.org/10.17113/ftb.54.02.16.4096>
- Kramer, B., Wunderlich, J., & Muranyi, P. (2017). Recent findings in pulsed light disinfection. *Journal of Applied Microbiology*, 122(4), 830-856. <https://doi.org/10.1111/jam.13389>
- Kwaw, E., Ma, Y., Tchabo, W., Apaliya, M. T., Sackey, A. S., Wu, M., & Xiao, L. (2018). Effect of pulsed light treatment on the phytochemical, volatile, and sensorial attributes of lactic acid-fermented mulberry juice. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 213-228. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1446024>
- Leong, T., Juliano, P., & Knoerzer, K. (2017). Advances in ultrasonic and megasonic processing of foods. *Food Engineering Reviews*, 9(3), 237-256. <https://doi.org/10.1007/s12393-017-9167-5>
- Li, X., Li, M., Ji, N., Jin, P., Zhang, J., Zheng, Y., Zhang, X., & Li, F. (2019). Cold plasma treatment induces phenolic accumulation and enhances antioxidant activity in fresh-cut pitaya (*Hylocereus undatus*) fruit. *Lwt*, 115, 108447. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108447>
- Mahendran, R., Ramanan, K. R., Barba, F. J., Lorenzo, J. M., López-Fernández, O., Munekata, P. E., ... & Tiwari, B. K. (2019). Recent advances in the application of pulsed light processing for improving food safety and increasing shelf life. *Trends in food*

- science & technology, 88, 67-79. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.010>
- Mandal, R., Mohammadi, X., Wiktor, A., Singh, A., & Pratap Singh, A. (2020). Applications of pulsed light decontamination technology in food processing: An overview. *Applied Sciences*, 10(10), 3606. <https://doi.org/10.3390/app10103606>
- Marangoni Júnior, L., & Anjos, C. A. R. (2018). Effect of high-pressure processing on characteristics of flexible packaging for foods and beverages. *Food Research International*, 119, 920-930. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.078>
- Martínez-Ramos, T., Benedito-Fort, J., Watson, N. J., Ruiz-López, I. I., Che-Galicia, G., & Corona-Jiménez, E. (2020). Effect of solvent composition and its interaction with ultrasonic energy on the ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from Mango peels (*Mangifera indica* L.). *Food and Bioproducts Processing*, 122, 41-54. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.03.011>
- Martínez-Zamora, L., Castillejo, N., Gómez, P. A., & Artés-Hernández, F. (2021). Amelioration effect of LED lighting in the bioactive compounds synthesis during carrot sprouting. *Agronomy*, 11(2), 304. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020304>
- Mustafa, F. H., & Jaafar, M. S. (2013). Comparison of wavelength-dependent penetration depths of lasers in different types of skin in photodynamic therapy. *Indian Journal of Physics*, 87, 203-209. <https://doi.org/10.1007/s12648-012-0213-0>
- Nabi, B. G., Mukhtar, K., Arshad, R. N., Radicetti, E., Tedeschi, P., Shahbaz, M. U., Walayat, N., Nawaz, A., Inam-Ur-Raheem, M., & Aadil, R. M. (2021). High-pressure processing for sustainable food supply. *Sustainability*, 13(24), 13908. <https://doi.org/10.3390/su132413908>
- Najafabadi, N. S., Sahari, M. A., Barzegar, M., & Esfahani, Z. H. (2017). Effect of gamma irradiation on some physicochemical properties and bioactive compounds of jujube (*Ziziphus jujuba* var vulgaris) fruit. *Radiation Physics and Chemistry*, 130, 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.07.002>
- Naveena, B., & Nagaraju, M. (2020). Review on principles, effects, advantages and disadvantages of high pressure processing of food. *International Journal of Chemical Studies*, 8(2), 2964-2967. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i2at.9202>
- Niu, D., Zeng, X. A., Ren, E. F., Xu, F. Y., Li, J., Wang, M. S., & Wang, R. (2020). Review of the application of pulsed electric fields (PEF) technology for food processing in China. *Food Research International*, 137, 109715. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109715>
- Nowacka, M., Tappi, S., Wiktor, A., Rybak, K., Miszczykowska, A., Czyzewski, J., Drozdal, K., Witrowa-Rajchert, D., & Tylewicz, U. (2019). The impact of pulsed electric field on the extraction of bioactive compounds from beetroot. *Foods*, 8(7), 244. <https://doi.org/10.3390/foods8070244>
- Obileke, K., Onyeaka, H., Miri, T., Nwabor, O. F., Hart, A., Al-Sharify, Z. T., ... & Anumudu, C. (2022). Recent advances in radio frequency, pulsed light, and cold plasma technologies for food safety. *Journal of Food Process Engineering*, 45(10), e14138. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14138>
- Ojha, K. S., Tiwari, B. K., O'Donnell, C., & Kerry, J. P. (2016). Emerging Nonthermal Food Preservation Technologies. *Innovation and Future Trends in Food Manufacturing and Supply Chain Technologies*, 257-274. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-447-5.00009-5>
- Okuda, K., Kawachi, A., & Yomogida, K. (2020). Quality improvements to mackerel (*Scomber japonicus*) muscle tissue frozen using a rapid freezer with the weak oscillating magnetic fields. *Cryobiology*, 95, 130-137. <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2020.05.005>
- Olatunde, O. O., & Benjakul, S. (2018). Nonthermal Processes for Shelf-Life Extension of Seafoods: A Revisit. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(4), 892-904. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12354>
- Otero, L., Pérez-Mateos, M., Rodríguez, A. C., & Sanz, P. D. (2017). Electromagnetic freezing: Effects of weak oscillating magnetic fields on crab sticks. *Journal of Food Engineering*, 200, 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.12.018>
- Paixão, L. M. N., Fonteles, T. V., Oliveira, V. S., Fernandes, F. A. N., & Rodrigues, S. (2018). Cold Plasma Effects on Functional Compounds of Siriguela Juice. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 110-121. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2197-z>
- Pataro, G., Sinik, M., Capitoli, M. M., Donsi, G., & Ferrari, G. (2015). The influence of post-harvest UV-C and pulsed light treatments on quality and antioxidant properties of tomato fruits during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 30, 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.06.003>
- Pattnaik, M., Pandey, P., Martin, G. J., Mishra, H. N., & Ashokkumar, M. (2021). Innovative technologies for extraction and microencapsulation of bioactives from plant-based food waste and their applications in functional food development. *Foods*, 10(2), 279. <https://doi.org/10.3390/foods10020279>
- Pérez-Andrés, J. M., Charoux, C. M. G., Cullen, P. J., & Tiwari, B. K. (2018). Chemical modifications of lipids and proteins by nonthermal food processing technologies. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(20), 5041-5054. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc>
- Pérez-Jiménez, J. (2019). Potencial de los polifenoles de la dieta (extraíbles y no extraíbles) en la prevención de enfermedades cardiometabólicas. *ANALES RANM*, 136(2), 298-307. <http://dx.doi.org/10.32440/ar.2019.136.03.rev11>
- Pi, X., Yang, Y., Sun, Y., Wang, X., Wan, Y., Fu, G., Li, X., & Cheng, J. (2022). Food irradiation: a promising technology to produce hypoallergenic food with high quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(24), 6698-6713. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1904822>
- Pirozzi, A., Pataro, G., Donsi, F., & Ferrari, G. (2021). Edible coating and pulsed light to increase the shelf life of food products. *Food Engineering Reviews*, 13, 544-569. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09245-w>
- Pollock, A. M., Singh, A. P., Ramaswamy, H. S., & Ngadi, M. O. (2017). Pulsed light destruction kinetics of *L. monocytogenes*. *LWT*, 84, 114-121. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.040>
- Poonia, A., Pandey, S., & Vasundhara. (2022). Application of light emitting diodes (LEDs) for food preservation, post-harvest losses and production of bioactive compounds: A review. *Food Production, Processing and Nutrition*, 4(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s43014-022-00086-0>
- Prasad, A., Du, L., Zubair, M., Subedi, S., Ullah, A., & Roopesh, M. S. (2020). Applications of light-emitting diodes (LEDs) in food processing and water treatment. *Food Engineering Reviews*, 12, 268-289. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09221-4>
- Priyadarshini, A., Rajauria, G., O'Donnell, C. P., & Tiwari, B. K. (2018). Emerging Food Processing Technologies and Factors Impacting their Industrial Adoption. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(19), 3082-3101. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1483890>
- Purnell, G., James, C. & James, S.J. The Effects of Applying Oscillating Magnetic Fields During the Freezing of Apple and Potato. *Food Bioprocess Technol*, 10, 2113-2122 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1983-3>
- Puza, E. A., Mayo, F. E. C., Polo, J. M. A., la Matta, D., Perea, A., Espinoza, J. S., & Alva, J. C. (2019). Effect of freezing with oscillating magnetic fields on the physical and sensorial characteristics of mango (*Mangifera indica* L. cv.'Kent'). *Brazilian Journal of Food Technology*, 22, e2018169. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.16918>
- Qian, H., Liu, T., Deng, M., Miao, H., Cai, C., Shen, W., & Wang, Q. (2016). Effects of light quality on main health-promoting compounds and antioxidant capacity of Chinese kale sprouts. *Food chemistry*, 196, 1232-1238. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.055>

- Radhakrishnan, M., Maqsood, S., & Siliveru, K. (2023). Emerging non-thermal technology applications for sustainable food processing. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1190320. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1190320>
- Rahaman, A., Zeng, X.-A., Farooq, M. A., Kumari, A., Murtaza, M. A., Ahmad, N., Faisal, M., Hassan, Z., Ahmad, Z., Bo-Ru, C., Jinjing, Z., & Siddeeq, A. (2020). Effect of pulsed electric fields processing on physicochemical properties and bioactive compounds of apricot juice. *Journal of Food Process Engineering*, 43(8), e13449. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13449>
- Ravindran, R., & Jaiswal, A. K. (2019). Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods. *Food chemistry*, 285, 363-368. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.002>
- Ribeiro, N. G., Xavier-Santos, D., Campelo, P. H., Guimaraes, J. T., Pimentel, T. C., Duarte, M. C. K., Freitas, M. Q., Esmerino, E. A. Silva, M. C., & Cruz, A. G. (2022). Dairy foods and novel thermal and non-thermal processing: a bibliometric analysis. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 76, 102934. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102934>
- Rodríguez, A. C., James, C., & James, S. J. (2017). Effects of weak oscillating magnetic fields on the freezing of pork loin. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 1615-1621. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1931-2>
- Rodríguez-Roque, M. J., de Ancos, B., Sánchez-Moreno, C., Cano, M. P., Elez-Martínez, P., & Martín-Belloso, O. (2015). Impact of food matrix and processing on the in vitro bioaccessibility of vitamin C, phenolic compounds, and hydrophilic antioxidant activity from fruit juice-based beverages. *Journal of Functional Foods*, 14, 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.01.020>
- Rybak, K., Wiktor, A., Pobięga, K., Witrowa-Rajchert, D., & Nowacka, M. (2021). Impact of pulsed light treatment on the quality properties and microbiological aspects of red bell pepper fresh-cuts. *Lwt*, 149, 111906. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111906>
- Sack, M., & Mueller, G. (2017). Design considerations for electroporation reactors. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(4), 1992-2000. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.006219>
- Sánchez-Moreno, C., González-Peña, D., Colina-Coca, C., Ancos, B. de, Sánchez-Moreno, C., González-Peña, D., Colina-Coca, C., & Ancos, B. de. (2018). Métodos físicos no tradicionales de control microbiológico aplicables al proceso de elaboración de hortalizas de IV Gama. *Agrociencia (Uruguay)*, 22(1), 26-36. <https://doi.org/10.31285/agro.22.1.3>
- Santos, A. L. dos, Morais, R. A., Soares, C. M. da S., Vellano, P. O., Martins, G. A. de S., Damiani, C., & Souza, A. R. M. de. (2022). Effect of Gamma Irradiation on the Physicochemical, Functional and Bioactive Properties of Red Pitaya (*Hylocereus Costaricensis*) Bark Flour. *SSRN Electronic Journal*, 199. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4025958>
- Shabana, E. F., Gabr, M. A., Moussa, H. R., El-Shaer, E. A., & Ismaiel, M. M. (2017). Biochemical composition and antioxidant activities of *Arthrospira* (*Spirulina*) platensis in response to gamma irradiation. *Food Chemistry*, 214, 550-555. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.109>
- Siddeeq, A., Faisal Manzoor, M., Haseeb Ahmad, M., Ahmad, N., Ahmed, Z., Kashif Iqbal Khan, M., Maan, A., Nisa, M., Zeng, Z., & Ammar, A. F. (2019). Pulsed electric field-assisted ethanolic extraction of date palm fruits: Bioactive compounds, antioxidant activity and physicochemical properties. *Processes*, 7(9), 585. <https://doi.org/10.3390/pr7090585>
- Singla, M., & Sit, N. (2021). Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105506. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105506>
- Song K, Taghipour F, Mohseni M (2018) Microorganisms inactivation by continuous and pulsed irradiation of ultraviolet lightemitting diodes (UV-LEDs). *Chemical Engineering Journal*, 343, 362-370. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.020>
- Suslick, K. S., Eddingsaas, N. C., Flannigan, D. J., Hopkins, S. D., & Xu, H. (2011). Extreme conditions during multibubble cavitation: Sonoluminescence as a spectroscopic probe. *Ultrasonics sonochemistry*, 18(4), 842-846. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.12.012>
- Tirado-Kulieva, V., Miranda Zamora, W. R., & Leyva Povis, N. L. (2021). Análisis crítico del potencial del plasma frío como tecnología no destructiva en el procesamiento alimentario: situación actual y tendencias futuras. *Revista de La Universidad Del Zulia*, 12(32), 284-316. <https://doi.org/10.46925/rdluz.32.18>
- Ucar, Y., Ceylan, Z., Durmus, M., Tomar, O., & Cetinkaya, T. (2021). Application of cold plasma technology in the food industry and its combination with other emerging technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 355-371. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.004>
- Valdivia-Nájar, C. G., Martín-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2018). Kinetics of the changes in the antioxidant potential of fresh-cut tomatoes as affected by pulsed light treatments and storage time. *Journal of Food Engineering*, 237, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.029>
- Vargas-Ramella, M., Pateiro, M., Gavahian, M., Franco, D., Zhang, W., Khaneghah, A. M., Guerrero-Sánchez, Y., & Lorenzo, J. M. (2021). Impact of pulsed light processing technology on phenolic compounds of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 115, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.037>
- Viacava, F., Ortega-Hernández, E., Welti-Chanes, J., Cisneros-Zevallos, L., & Jacobo-Velázquez, D. A. (2020). Using High Hydrostatic Pressure Processing Come-Up Time as an Innovative Tool to Induce the Biosynthesis of Free and Bound Phenolics in Whole Carrots. *Food and Bioprocess Technology*, 13, 1717-1727. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02512-y>
- Waghmare, R. (2021). Cold plasma technology for fruit based beverages: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 114, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.018>
- Wang, L., Boussetta, N., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2020). Cell disintegration of apple peels induced by pulsed electric field and efficiency of bio-compound extraction. *Food and Bioprocess Technology*, 122, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.03.004>
- Wang, Q., Li, Y., Sun, D. W., & Zhu, Z. (2018). Enhancing food processing by pulsed and high voltage electric fields: Principles and applications. *Critical reviews in food science and nutrition*, 58(13), 2285-2298. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1434609>
- Wojcik, A., & Harms-Ringdahl, M. (2019). Radiation protection biology then and now. *International journal of radiation biology*, 95(7), 841-850. <https://doi.org/10.1080/09553002.2019.1589027>
- Woldemariam, H. W., & Emire, S. A. (2019). High Pressure Processing of Foods for Microbial and Mycotoxins Control: current trends and future prospects. *Cogent Food and Agriculture*, 5(1), 1622184. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1622184>
- Wolf, R. A. (2012). *Atmospheric pressure plasma for surface modification*. John Wiley & Sons.
- Yanğış Yüksel Ç, Karagözlü N. (2017). Soğuk Atmosferik Plazma Teknolojisi ve Gıdalarda Kullanımı. *Adü Ziraat Dergisi*, 14(2), 81-86. <https://doi.org/10.25308/aduziraat.332684>
- Yasui, K., & Yasui, K. (2018). *Acoustic cavitation* (pp. 1-35). Springer International Publishing.
- Yuan, S., Li, C., Zhang, Y., Yu, H., Xie, Y., Guo, Y., & Yao, W. (2021). Ultrasound as an emerging technology for the elimination of chemical contaminants in food: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 374-385. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.048>

- Zadeh, J. H., Pazir, F. (2023). Investigation of the potential applications of cold plasma technology in food safety. *GIDA*, 48(3) 614-626. <https://doi.org/10.15237/gida.GD22102>
- Zhang, C., Lyu, X., Arshad, R. N., Aadil, R. M., Tong, Y., Zhao, W., & Yang, R. (2023). Pulsed electric field as a promising technology for solid foods processing: A review. *Food Chemistry*, 403, 134367. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134367>
- Zhang, Z., Zhang, B., Yang, R., & Zhao, W. (2020). Recent Developments in the Preservation of Raw Fresh Food by Pulsed Electric Field. *Food Reviews International*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1860083>
- Zhao, H., Zhang, F., Hu, H., Liu, S., & Han, J. (2017). Experimental study on freezing of liquids under static magnetic field. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 25(9), 1288-1293. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2016.10.026>
- Zhao, L., Zhang, Y., Guo, S., Xiong, W., Xia, H., Liu, W., Pan, Z., & Venkatasamy, C. (2017). Effect of irradiation on quality of vacuum-packed spicy beef chops. *Journal of Food Quality*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1054523>
- Zhou, B., Lee, H., & Feng, H. (2012). *Microbial decontamination of food by power ultrasound*. In *Microbial decontamination in the food industry* (pp. 300-321). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857095756.2.300>