

Heat and non-heat treatments for maintaining food quality and safety. A review article

Ludeña-Eneque Cristopher Laif, Highest Degree, Estudiante Ingeniería Industrial ¹  and Mg. Leiva- Piedra Jorge Luis² 

^{1,2} Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u20220938@utp.edu.pe, jleiva@utp.edu.pe

Abstract– The objective of this review is to analyze the thermal and non-thermal treatments used in the food sector. For this purpose, 71 scientific articles that met the inclusion criteria were analyzed. The results of the analysis identified the challenges of thermal treatments and how they can degrade foods. Non-thermal technologies (ultrasound, SC-CO₂, HIPEF, cold plasma, pulsed energy, cryogenics, ozonation, membrane filtration, ionizing radiation and high hydrostatic pressure (HPP)) were also identified as promising alternatives, which prevent the formation of undesirable compounds and better preserve nutrients and sensory properties. It's concluded that the implementation of these technologies has demonstrated significant improvements in shelf life and improvements in food safety and quality.

Keywords-- Safety, process optimization, non-thermal treatments, non-thermal and thermal comparison.

Tratamientos térmicos y no térmicos para mantener la calidad y seguridad de los alimentos. Un artículo de revision.

Ludeña-Eneque Cristopher Laif, Highest Degree, Estudiante Ingeniería Industrial ¹ and Mg. Leiva- Piedra Jorge Luis²
^{1,2} Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u20220938@utp.edu.pe, jleiva@utp.edu.pe

Resumen– Esta revisión tiene como objetivo analizar los tratamientos térmicos y no térmicos utilizados en el sector de alimentos. Para ello, se analizaron 71 artículos científicos que cumplieron con los criterios de inclusión. Los resultados del análisis permitieron identificar los desafíos de los tratamientos térmicos y como estos pueden degradar los alimentos. Asimismo, se identificaron las tecnologías no térmicas (ultrasonido, SC-CO₂, HIPEF, plasma frío, energía pulsada, criogenización, ozonización, filtración por membranas, radiaciones ionizantes y alta presión hidrostática (HPP)), como alternativas prometedoras, las cuales evitan la formación de compuestos no deseados y preservan mejor los nutrientes y propiedades sensoriales. Se concluye que la implementación de estas tecnologías ha demostrado mejoras significativas en la vida útil y mejoras en la inocuidad y calidad de los alimentos.

Palabras clave-- inocuidad, optimización de procesos, tratamientos no térmicos, Comparación no térmica y térmica

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la calidad e inocuidad de los alimentos han sido objeto de una creciente preocupación global, reflejando una mayor conciencia sobre la importancia de garantizar los productos que consumimos [1][3]. Esto ha suscitado que se analicen principalmente los métodos basados en el tratamiento térmico, que han sido tradicionalmente empleados debido a su capacidad para estabilizar los productos y garantizar su calidad microbiológica [5]. Sin embargo, su aplicación puede generar la degradación y deterioro de los alimentos, trayendo consigo una pérdida de la calidad perceptible por los consumidores [3,5]. En este sentido surgen las tecnologías no térmicas como el ultrasonido, SC-CO₂, HIPEF, el plasma frío, energía pulsada (PLT), Criogenización, Ozonización, Filtración por membranas, radiaciones ionizantes y la alta presión hidrostática (HPP), como alternativas prometedoras para reducir la concentración de microorganismos y a su vez prolongar la vida útil de los alimentos [7,9]. Es importante considerar que la integración de estas tecnologías con otros métodos de procesamiento permite maximizar sus beneficios y superar sus limitaciones individuales [15, 16, 27].

A raíz de la ley Food Safety Modernization Act (FSMA) firmada en el 2011 por los Estados Unidos [10], se genera uno de los principales desafíos significativos que es impulsar el desarrollo de metodologías más efectivas y menos invasivas para garantizar la seguridad alimentaria, lo que llevó a un mayor interés y desarrollo de métodos de tratamiento no térmicos, puesto que los tratamientos térmicos generaban

degradación de nutrientes esenciales y componentes (vitaminas, polifenoles, antocianinas, etc.) beneficiosos de los alimentos [2,9]. Además, los tratamientos térmicos pueden inducir la formación de compuestos no deseados y potencialmente perjudiciales, como productos de reacción de Maillard y aminos heterocíclicas, que son conocidos por tener efectos adversos para la salud afectando su textura, aroma, palatabilidad de los alimentos o generar enfermedades transmitidas por alimentos (ETAs) [8].

En respuesta a esta tendencia, la innovación en el campo de la seguridad alimentaria se ha extendido globalmente demostrando que no es exclusiva de Estados Unidos. En ese sentido, el Codex Alimentarius establece normas internacionales para la seguridad alimentaria en países latinoamericanos [36]. Asimismo, en Europa, el Reglamento (CE) N.º 178/2002 promueve tecnologías avanzadas, mientras que, en México, la Ley General de la Salud (LGS) y las Normativas Oficiales Mexicanas (NOM) que regulan la inocuidad alimentaria [34]. Por otro lado, en Australia y Nueva Zelanda, la FSANZ desarrolla normas de seguridad alimentaria, y en Japón, la certificación JAS asegura uno de los estándares más estrictos [35]. A causa de esto países como Estados Unidos, España, Japón y Brasil realizaron estudios donde destacan los beneficios de los métodos no térmicos en la preservación de la calidad e inocuidad de los alimentos. No obstante, no todos los tratamientos no térmicos son igualmente eficaces para todos los tipos de alimentos. Por ejemplo, algunos métodos pueden no ser adecuados para productos frescos o cárnicos, lo que requiere una evaluación cuidadosa y específica. Además, es crucial equilibrar la efectividad en la inactivación de microorganismos con la preservación de los nutrientes y las propiedades sensoriales de los alimentos. [5,7]

Teniendo en cuenta lo descrito con anterioridad, el presente estudio busca analizar los tratamientos térmicos y no térmicos que se vienen utilizando en el sector de alimentos.

II. METODOLOGÍA

La metodología que se empleó en la investigación se basó en una “Revisión Sistemática de Literatura”. Para realizar la búsqueda de literatura científica se utilizó la estrategia PICO.

TABLA I
ESTRUCTURA PICO

Componente	Preguntas
Población	¿Cómo se está gestionando la calidad los productos?
Intervención	¿Cómo se mide y evalúa la calidad e inocuidad de los productos procesados con estos métodos no térmicos?
Comparación	¿Cuál es la eficiencia y viabilidad de los tratamientos no térmicos con los tratamientos térmicos tradicionales en la conservación de las propiedades nutricionales de los productos?
Resultados	¿Cuál es el resultado esperado de los tratamientos no térmicos en la conservación y en la vida útil de los productos?

TablaI. Elaboración propia

Los componentes de la pregunta PICO son: Bajo rendimiento de calidad y vida útil de productos por la mala aplicación de tratamientos térmicos y no térmicos en las empresas y se formuló la pregunta de investigación ¿En qué medida la aplicación de tratamientos térmicos y no térmicos permitirán una extensión en la vida útil de los productos alimenticios? En la tabla II se identificaron las palabras claves por cada componentes.

TABLA II
DEFINICIÓN DE TÉRMINOS POR COMPONENTES

	Palabras claves
Población	"Fresh packaged products", "management of treatments", "Fresh food"
Intervención	"Quality and Innocuity", "Nutritional qualities"
Comparación	"Heat Treatments", "Non-Thermal Treatments", "high hydrostatic pressures", "oscillating magnetic fields", "cold plasma treatment", "High Pressure Processing", "Non-thermal food processing", "Non-thermal technologies", "Thermal Processing", Pasteurization
Resultados	"Shelf life extension", "Conservation technologies", FSMA, "Nutritional and sensory quality preservation".

TablaII. Elaboración propia

La base de datos empleada para la búsqueda de literatura científica fue Scopus. La ecuación empleada fue: TITLE-ABS-KEY ("Fresh packaged products" OR "management of treatments" OR "Quality and Innocuity" OR "Nutritional qualities" OR "Heat Treatments" AND "Non-Thermal Treatments" OR "high hydrostatic pressures" OR "oscillating magnetic fields" OR "cold plasma treatment" OR "High Pressure Processing" OR "Non-thermal food processing" OR "Non-thermal technologies" OR "Thermal Processing" OR Pasteurization OR "Shelf life extension" OR "Conservation technologies" OR FSMA OR "Nutritional and sensory quality preservation") AND PUBYEAR > 2017 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")).

Al realizar la búsqueda se obtuvieron 1217 documentos en Scopus. Además, previamente se identificaron veinticuatro documentos potenciales para la revisión sistemática. Posteriormente de aplicar criterios de exclusión como fecha, tipo de artículo, Open Access entre otros, se consideraron 139 artículos cribados, de los cuales 110 fueron seleccionados para revisión a texto completo. Se determinó que 71 artículos cumplen con los criterios de inclusión y exclusión. La figura 1

muestra el proceso de selección de artículos bajo la metodología PRISMA.

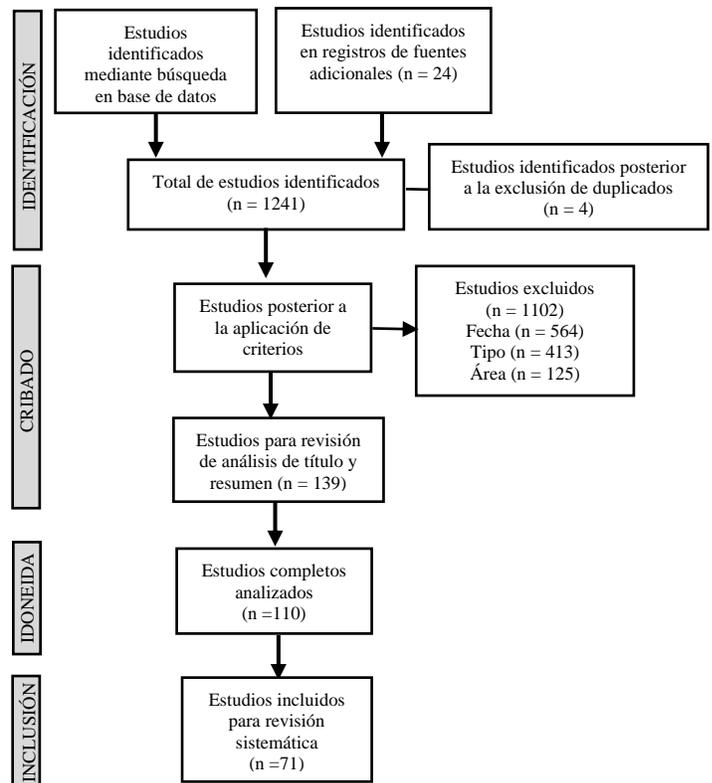


FIGURA 1. DIAGRAMA DE FLUJO PRISMA

III. METODOLOGÍA

A- GESTIONAN DE LA CALIDAD LOS ALIMENTOS

La gestión de la calidad e inocuidad de los alimentos es un desafío crítico en la industria alimentaria. Tales desafíos como evitar el desarrollo de enfermedades emitidas por alimentos, así como también la pérdida de nutrientes los cuales se dan durante los procesos de conservación (térmicos) [5,11,17]. Se estima que, en promedio, hasta un 33.8% de los nutrientes se pierden durante la cocción y el procesamiento térmico de los alimentos [13,20]. Por ejemplo, en la incorrecta aplicación de la técnica de esterilización y la pausterización, se puede perder entre un 60% y 40% de la vitamina C soluble en agua C [12]. A pesar de estas desventajas, los tratamientos térmicos siguen siendo ampliamente utilizados debido a su efectividad y menor costo de implementación en comparación con las tecnologías no térmicas emergentes. Los tratamientos no térmicos, aunque ofrecen ventajas en términos de retención de nutrientes, suelen ser más costosos debido a la inversión inicial en equipos especializados y los desafíos asociados con su implementación a escala industrial [37,38,39].

Si bien los tratamientos térmicos garantizaban alimentos libres de patógenos, también ocasionaban un alto deterioro nutricional. Por esta razón, Estados Unidos implementó la ley Food Safety Modernization Act (FSMA) [10, 24], que busca asegurar la inocuidad del suministro de alimentos regulados por la FDA [10].

Tabla III
TRATAMIENTOS TÉRMICOS TRADICIONALES EN CONSERVACIÓN DE PRODUCTOS

Tratamiento Térmicos	Descripción	Problema Generado	Referencia
Esterilización	Calentamiento a altas temperaturas (>100°C)	Deterioro significativo de nutrientes y calidad sensorial.	[4][12]
Pasteurización	Calentamiento a temperatura moderada (60-85°C)	Pérdida de vitamina C hasta un 40%. Perdida de sabor y aroma generando alteraciones perceptibles en alimentos sensibles.	[4][14][21]
Cocción	Cocción prolongada en agua caliente o vapor.	Pérdida de vitaminas hidrosolubles y cambios en textura.	[21][24]

Tabla III. Elaboración propia

Estos tratamientos térmicos convencionales eran eficaces para eliminar patógenos y prolongar la vida útil de los alimentos, pero con el inconveniente de afectar negativamente la calidad nutricional, sabor, textura y en algunos casos el valor sensorial de los alimentos procesados. En consecuencia, surgieron métodos de conservación no térmicos que permiten conservar los alimentos de forma eficaz sin los resultados negativos.

Tabla IV
B- IMPACTO DE LOS TRATAMIENTOS NO TÉRMICOS

Tratamiento	Aplicación	Impacto y Resultados	Referencias
SC-CO2	Jugos y líquidos	Impacto microbiológico: Elimina hasta el 99.5% de patógenos.	[8, 14, 26]
HPP	Productos cárnicos y lácteos.	Impacto microbiológico: Reduce hasta el 99.99% de patógenos.	[13, 18, 30]
HIPEF	Productos líquidos y semisólidos	Impacto microbiológico: Alcanza una reducción del 98% de inactivación de microorganismos.	[19, 20]
Ultrasonido	Productos frescos	Impacto microbiológico: Reduce la concentración de patógenos bacterianos	[5][7]
Plasma frío	hojas verdes (col Kale)	Impacto microbiológico: Reducción bacteriana (E. coli 0157:H7)	[22][12]
SC-CO2	Jugos	Impacto Nutricional: Preserva hasta el 92% de antioxidantes	[2, 19, 21]
HIPEF	Jugos	Impacto Nutricional: Mantiene el 85% de compuestos bioactivos como antioxidantes y polifenoles. Además, preserva el 92% de antioxidantes, comparado con el 70%	[19, 20]

		de tratamientos pausterizados.	
HPP	Frutas (fresas y tomates)	Impacto Nutricional: Retiene más vitamina C y antioxidantes que los métodos tradicionales.	[13, 21]
Ultrasonido	Jugos de frutas	Impacto Nutricional: Preservación de nutrientes.	[7, 19]
Plasma frío	Carnes, lácteos y verduras recién cosechadas	Impacto Sensorial: Conserva la textura y color originales en un 90%.	[9, 12]
HIPEF	Productos lácteos	Impacto Sensorial: Mantiene mejor sabor y textura.	[32]
SC-CO2	Jugos de naranja tratados	Impacto Sensorial: Conservan sabor fresco y natural.	[7, 8]
Radiaciones ionizantes	Productos cárnicos	Impacto Sensorial: Pueden causar cambios en el sabor (a metálico) y olor.	[4]
HPP	Productos cárnicos	Impacto Sensorial: Mejora la textura y el sabor de productos cárnicos.	[18, 24]
SC-CO2	Jugos	Alargamiento de vida útil: Extiende en un 8.6% (20 días adicionales) en EE.UU.	[7, 8, 14]
HIPEF	Productos lácteos y vegetales	Alargamiento de vida útil: Aumenta en un 40% a través de estudios realizados en España.	[19, 20]
Plasma frío	Productos lácteos y vegetales	Alargamiento de vida útil: Aumenta un 90% a través de estudios realizados en España.	[9, 22, 28]
Criogenización	Productos del mar (pescado, langosta, etc.)	Alargamiento de vida útil: Aumenta en un 25% a través de estudios realizados en Japón.	[12]
SC-CO2	Bebidas	Alargamiento de vida útil: Aumenta en un 10% a través de estudios realizados en Japón.	[7, 8]
Ozonización y filtración por membranas	Productos cárnicos y lácteos	Alargamiento de vida útil: Aumenta en un 30% y de lácteos en un 20% a través de estudios realizados en Alemania. Además, reducen E. coli y Salmonella en un 99% y mantienen un 95% de nutrientes.	[4,31]
HPP	Frutas tropicales y jugo	Alargamiento de vida útil: Aumenta un 35% y 15%, respectivamente, a través de estudios	[13, 14, 37]

		realizados en Brasil. Además, Preserva antocianinas hasta en un 88% y reduce microorganismos en un 96%.	
Ultrasonido	Jugos de fresa	Alargamiento de vida útil: Aumenta en un 4.2%	[19, 20]

TablaIV. Elaboración propia

En la tabla IV se muestra el impacto que han tenido los distintos tratamientos no térmicos a lo largo del tiempo para gestionar la calidad e inocuidad de los alimentos. Estos mismos han ido evolucionando a nivel tecnológico la forma en que se producen y conservan los alimentos [35]. Demostrándose así que estos procesos permiten inactivar microorganismos, preservar mejor las propiedades nutricionales y sensoriales, y reducir el consumo energético, lo que resulta en productos más frescos, naturales y seguros [1,4]. Además, su flexibilidad y escalabilidad han impulsado su adopción, permitiendo a los productores adaptarlos a diferentes productos y procesos [37]. La mayor aceptación por parte de los consumidores, que buscan alimentos mínimamente procesados y naturales, ha sido un factor clave en su creciente popularidad. Dichas tecnologías han sido corroboradas mediante estudios para poder determinar el impacto microbiológico, nutricional, sensorial y alargamiento de vida útil, para asegurar la calidad e inocuidad del producto durante el tratamiento. [3,6,38]

C- ANÁLISIS DE COSTOS Y BENEFICIOS

La industria alimentaria se enfrenta a desafíos económicos significativos al considerar la adopción de tecnologías no térmicas para el procesamiento de alimentos. Los métodos térmicos como la pasteurización ofrecen costos operativos más bajos, con un costo aproximado de 1.5 centavos de dólar por litro para el jugo de naranja [68]. Por otro lado, las tecnologías no térmicas, como las altas presiones hidrostáticas (HHP), presentan un costo de procesamiento significativamente mayor, alrededor de 10.7 centavos de dólar por litro, lo que representa un incremento del 713% comparado con el tratamiento térmico [66, 68].

Por su parte, la tecnología de pulsos eléctricos, aunque es más económica en comparación con las HHP, aún implica un costo de 3.7 centavos de dólar por litro para el jugo de naranja y 2.5 centavos de dólar para otros jugos de frutas, lo que representa un incremento del 246% y 166% respectivamente [65]. Asimismo, el procesamiento de leche mediante pasteurización cuesta 37.64 centavos por litro, mientras que los tratamientos realizados por pulsos eléctricos es considerablemente más costoso, alcanzando los 52.31 centavos por litro, es decir un 139% más caro [69]. Estos costos, si bien reflejan una inversión inicial más elevada requerida para implementar tecnologías no térmicas, estas ofrecen ventajas tangibles en términos de preservación de la calidad nutricional (<90%) y sensorial de los alimentos

(<96%), así como en la extensión de su vida útil (<8-12%) [67]. Además, se demostró que la cantidad de residuos totales generados por los tratamientos no térmicos a comparación de los tratamientos térmicos es todavía menor, donde se genera una reducción 4.3% menos a comparación de los tratamientos convencionales [71].

D- EFICIENCIA Y VIABILIDAD DE LOS TRATAMIENTOS NO TÉRMICOS CON LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS TRADICIONALES

No obstante, no todos los tratamientos no térmicos son útiles para la conservación de la calidad de ciertos productos, en ese sentido podemos mencionar las ventajas, desventajas y eficiencia presenta por los distintos tratamiento térmicos y no térmicos para su evaluación.

TABLA V
TRATAMIENTO TÉRMICOS Y EFICIENCIA EN LA CONSERVACIÓN DE PRODUCTOS

Tratamiento	Principio de acción	Ventajas	Desventajas	Eficiencia	Viabilidad	Productos	Referencias
Esterilización	Calentamiento a altas temperaturas (>100°C) para inactivar microorganismos	Eficaz contra esporas bacterianas, bajo costo de operación, tratamiento rápido	Se pierden vitaminas hidrosolubles (grupo B y vitamina C). Puede originar cambios en el sabor y el color original del alimento.	eficaz para reducir la carga microbiana en alimentos, logrando reducciones de hasta 5 log UFC/g (99,999%) en especias y otros productos deshidratados.	La esterilización térmica es ampliamente utilizada en la industria alimentaria debido a su eficacia probada y bajo costo de operación	Especias, hierbas, condimentos, vegetales deshidratados	[1] [37]
Pasteurización	Calentamiento a temperaturas moderadas (60-85°C) para inactivar microorganismos	Bajo costo de operación, productos seguros para el consumo y para reducir su putrefacción	Pueden perderse algunas propiedades organolépticas del producto.	eficaz para reducir la carga microbiana en jugos y conservas hasta en 5 log UFC/mL o g (99,999%).	Es aplicable a una gran variedad de productos como jugos, leche, conservas, sopas y salsas.	Conservas, jugos, leche, sopas, salsas, panadería	[2] [7] [55]
Cocción	Calentamiento prolongado en agua caliente o vapor para inactivar microorganismos	Preserva el sabor de los alimentos, reduce el riesgo de intoxicaciones alimentarias y los hace más digeribles	Altera la estructura de los nutrientes y disminuye su valor alimenticio, formando a menudo sustancias cancerígenas.	eficaz para reducir la carga microbiana en jugos y conservas hasta en 5 log UFC/mL o g (99,999%).	Es aplicable a una amplia gama de productos, desde conservas y sopas hasta productos de panadería.	Conservas, jugos, leche, sopas, salsas, panadería	[38] [59]

Los tratamientos térmicos como la esterilización, pasteurización y cocción han sido ampliamente utilizados en la industria alimentaria debido a su eficacia y bajo costo [1, 2, 38]. Sin embargo, estos métodos pueden afectar negativamente las propiedades organolépticas y nutricionales de los alimentos [55, 59].

TABLA VI
TRATAMIENTO NO TÉRMICOS Y EFICIENCIA EN LA CONSERVACIÓN DE PRODUCTOS

Tratamiento	Principio de acción	Ventajas	Desventajas	Eficiencia	Viabilidad	Productos	Referencias
Ultrasonido	Ondas sonoras de alta frecuencia que causan cavitación	Mejora de la extracción y funcionalidad de ingredientes, aumenta la biodisponibilidad de compuestos bioactivos.	Limitado para inactivar esporas, posibles cambios en textura y sabor	Reduce carga microbiana en jugos y bebidas hasta 5 log UFC/mL (99,999%)	Viable para productos líquidos y semisólidos.	Jugos, bebidas, purés, sopas, salsas, postres lácteos	[5] [14] [26] [57] [58]
SC-CO ₂	Uso de CO ₂ a presurizado condiciones supercríticas	Baja temperatura, selectividad, ausencia de residuos, preservación de compuestos bioactivos, extracción selectiva de compuestos.	Alto costo, limitado para inactivar esporas	Reduce carga microbiana en especias hasta 2 log UFC/g (98,71%)	Viable para productos termosensibles.	Especias, hierbas, frutos secos, aceites, extractos	[2] [3]
HIPEF	Aplicación de pulsos eléctricos de alta intensidad	Bajo consumo energético, corto tiempo de procesamiento, preservación de nutrientes y compuestos bioactivos	Limitado para inactivar esporas, posibles cambios en viscosidad	Reduce carga microbiana en jugos hasta 3 log UFC/mL (98,973%)	Viable para productos líquidos.	Jugos, bebidas, sopas, salsas, purés, lácteos	[32] [40]
Plasma frío	Generación de gas ionizado a baja temperatura	Fácil implementación, eficaz contra biopelículas bacterianas, no genera residuos.	Limitado para inactivar esporas, posibles cambios en color y sabor	Reduce carga microbiana en superficies hasta 5 log UFC/cm ² (99,999%)	Viable para descontaminación de superficies.	Carnes, pescados, frutas, vegetales, envases	[9][22][28] [31] [43] [51]

Energía pulsada (PLT)	Aplicación de pulsos de luz de alta intensidad	Eficaz contra esporas bacterianas, tratamiento rápido y uniforme	Limitado en alimentos opacos (frutas, galletitas, cereales para el desayuno, queso, harina, jugo de tomate, queso y carnes.), posibles cambios	Reduce carga microbiana en superficies hasta 5 log UFC/cm ² (99,999%)	Viable para descontaminación de superficies y envases.	Quesos, carnes, pescados, frutas, vegetales, envases	[19] [47]
Criogenización	Congelación a temperaturas criogénicas (-80°C a -196°C)	Preservación de la calidad sensorial y nutricional, reducción de mermas y pérdidas, mayor vida útil.	Alto costo energético, posibles cambios en textura y color	Reduce carga microbiana en vegetales entre <3 – 4> log UFC/g	Viable para productos termosensibles.	Vegetales, frutas, carnes, pescados, lácteos	[21] [56]
Ozonización	Uso de ozono gaseoso como agente oxidante	Eficaz contra biofilms bacterianos, fácil generación in situ, no genera residuos	Corto tiempo de vida media, posibles cambios en color y sabor	Reduce carga microbiana en vegetales hasta 3 log UFC/g (99,9%)	Viable para descontaminación de superficies y agua.	Vegetales, frutas, carnes, pescados, agua	[4] [31]
Filtración por membranas	Uso de membranas semipermeables para retener microorganismos	Bajo costo energético, fácil escalado, preservación de nutrientes y compuestos bioactivos	Limitado para inactivar virus y esporas. Inestabilidad en la actividad enzimática de los microorganismos debido a los cambios en la temperatura y el pH del agua residual	Retiene microorganismos hasta 6 log UFC/mL (99,9999%)	Viable para clarificación y esterilización de jugos y bebidas	Jugos, bebidas, vinos, cervezas, sueros lácteos	[29]
Radiaciones ionizantes	Uso de radiaciones de alta energía (gamma, electrones, rayos X)	Eficaz contra esporas bacterianas, bajo costo de operación, tratamiento rápido	Variaciones de las propiedades de los alimentos y posible aparición de furanonas en productos grasos en alta dosis	Reduce carga microbiana en especias hasta 4 log UFC/g (99,9%)	Viable para descontaminación de especias y condimentos.	Especias, hierbas, condimentos, vegetales deshidratados	[1] [3] [4]
Alta presión hidrostática (HPP)	Aplicación de altas presiones (100-600 MPa)	Preservación de la calidad sensorial y nutricional, proceso en batch, mayor vida útil	No inactiva esporas, Posibles cambios de textura o color como las macromoléculas (proteínas y polisacáridos)	Reduce carga microbiana en jugos y carnes hasta 5 log UFC/mL o g (99,999%)	Viable para productos listos para consumir.	Jugos, bebidas, carnes, pescados, mariscos, guacamole, hummus	[13][16][18] [21] [30] [37]

La TABLA VI se presenta a los tratamientos no térmicos más utilizados en la conservación de alimentos. En ello podemos encontrar desde el ultrasonido hasta la alta presión hidrostática, estas tecnologías ofrecen soluciones efectivas para reducir la carga microbiana mientras preservan la calidad de los alimentos [5, 13, 19, 29]. Aunque cada método tiene sus limitaciones, como la dificultad para inactivar esporas o los altos costos iniciales, todos demuestran una alta eficacia en la reducción de microorganismos, alcanzando reducciones de hasta 3-6 log UFC [22, 32, 47]. La viabilidad de estos tratamientos varía según el tipo de producto; sin embargo, en general, proporcionan opciones versátiles para una amplia gama de alimentos, desde líquidos hasta sólidos [26, 43, 56]. Por último, teniendo en cuenta el comparativo mostrado anteriormente, podemos evidenciar que los tratamientos no térmicos aún son poco aplicados, tal es así existe el caso de la empresa Coldpress Foods quién adoptó esta tecnología para mantener la frescura y el sabor natural de sus productos, logrando conservar hasta el 90% de las vitaminas y antioxidantes [71]. Además, no solo aseguró una significativa reducción de carga microbiana de hasta 6-log, sino que también preservó la textura y color del producto, que son aspectos fundamentales para la aceptación del consumidor [71, 72].

E- PERSPECTIVA DE LA APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS NO TÉRMICOS

Los tratamientos no térmicos han emergido como una solución innovadora para los desafíos de conservación en la industria alimentaria, ofreciendo resultados notables en la extensión de la vida útil y la preservación de la calidad de los productos. Estas tecnologías, que incluyen el procesamiento por alta presión (HPP), campos eléctricos pulsados (PEF), plasma frío, ultrasonido y luz pulsada, están redefiniendo los estándares de conservación [1, 2, 3, 4].

En Estados Unidos, investigadores han realizado estudios significativos sobre la aplicación de estos métodos. Demostrándose que el tratamiento con plasma frío en hojas de col rizada bebé logró una reducción sustancial en la población de *E. coli*, sin afectar visiblemente la calidad del producto [22]. Además, evidenciaron que el HPP puede ayudar a cumplir con los estándares de rendimiento para *E. coli* en productos cárnicos como el salchichón de verano [42]. En España, los estudios han sido igualmente prometedores, donde se realizó una revisión exhaustiva sobre la aplicación de plasma frío en la conservación de alimentos, destacando su eficacia en la inactivación microbiana y la preservación de la calidad [31]. Asimismo, se reportó que el kéfir elaborado con leche tratada por alta presión mantuvo su calidad durante un período prolongado, superando significativamente su vida útil [41]. Por otro lado, en Japón ha contribuido con investigaciones importantes en este campo. En este país se estudió el efecto combinado de la alta presión hidrostática y el agua electrolizada alcalina en la reducción de la resistencia al calor de las esporas bacterianas, demostrando una sinergia efectiva entre estas tecnologías no térmicas aplicada en productos enlatados [27]. Asimismo, en Brasil investigaron el impacto de los procesos de conservación en el perfil lipídico y los factores inmunológicos de productos lácteos, encontrando que los tratamientos no térmicos preservaban mejor ciertos componentes bioactivos (polifenoles, terpenos y lignanos) [15].

De otro lado, la extensión de la vida útil es uno de los resultados más significativos de estos tratamientos. Estudios en diversos países han demostrado que el procesamiento por alta presión puede extender la vida útil de jugos y otros productos. Además, esta extensión no solo tiene implicaciones económicas, sino que también contribuye a la reducción de desperdicio de origen alimentario [13, 50, 56].

Por otro lado, la preservación de compuestos bioactivos y propiedades nutricionales en alimentos viene mostrando resultados destacados en los cuales se evidencia que el procesamiento por alta presión retiene mejores vitaminas, compuestos fenólicos y mantiene una mayor actividad antioxidante en comparación con la pasteurización térmica convencional [21, 25, 45].

Del mismo modo, la mejora de las propiedades sensoriales a demostrado ser significativa, puesto que en varios países han encontrado que la combinación de alta presión y calor suave en diversos productos resultó en una

mejor retención de compuestos responsables del aroma y color [19, 20, 53]. Es por ello, que los productos lácteos tratados por alta presión mantuvieron mejor su calidad y características sensoriales durante el procesamiento de estos [17, 46]. Además, los tratamientos no térmicos han demostrado ser efectivos en la inactivación de enzimas que causan deterioro.

Estos resultados, respaldados por estudios internacionales, posicionan a los tratamientos no térmicos como una tecnología prometedora para la industria alimentaria. Así pues, estos tratamientos demuestran que permiten la inactivación de enzimas como el polifenol oxidasa y la peroxidasa en diversos productos [14, 47]. Sin embargo, como señalan investigadores de diversos países, la eficacia de estos tratamientos puede variar según el tipo de alimento y las condiciones específicas de procesamiento, por lo que se necesita más investigación para optimizar su aplicación en diferentes matrices alimentarias [37, 38, 39]. Además, es importante considerar la integración de estas tecnologías no térmicas con otros métodos de procesamiento para maximizar sus beneficios y superar sus limitaciones individuales [15, 16, 27].

IV. DISCUSIÓN

En este estudio de revisión, se observa una transformación significativa en la gestión de la calidad de los productos gracias a la adopción de tecnologías no térmicas. En ese sentido podemos destacar las tecnologías emergentes, como el procesamiento por alta presión (HPP) y los campos eléctricos pulsados (PEF), no solo están mejorando la vida útil y la seguridad alimentaria, sino que también preservan mejor las propiedades nutricionales y sensoriales de los alimentos [2]. A diferencia de los métodos térmicos tradicionales, estas tecnologías no térmicas generalmente resultan en una mejor retención de nutrientes y compuestos bioactivos [4]. Asimismo, el plasma frío está emergiendo como una tecnología versátil, particularmente útil para la descontaminación superficial de frutas y verduras frescas [22]. Por otro lado, el ultrasonido, en contraste con las tecnologías térmicas, puede mejorar la extracción y funcionalidad de ingredientes, aumentando la biodisponibilidad de compuestos bioactivos [5].

En cuanto a la medición y evaluación de la calidad e inocuidad, se ha observado un enfoque multidimensional. El HPP ha demostrado ser capaz de lograr reducciones microbianas de hasta 5 log UFC/g en una amplia gama de productos, igualando o incluso superando la eficacia de los métodos térmicos tradicionales [13]. Por otra parte, estudios comparativos han reportado que los tratamientos con HPP y PEF pueden preservar hasta el 92% de los antioxidantes en jugos, en contraste con solo el 70% en los jugos pasteurizados térmicamente [19]. Además, se ha encontrado que las características sensoriales, incluyendo color, sabor, aroma y textura, se mantienen mejor con tecnologías no térmicas [21].

En cuanto a la vida útil del producto, se ha reportado que tecnologías como el HPP pueden extenderla en productos como jugos y carnes procesadas hasta en un 50%,

manteniendo al mismo tiempo una calidad sensorial y nutricional superior [56]. Cabe destacar que se están desarrollando y aplicando nuevos métodos de evaluación, como el uso de sensores para proporcionar evaluaciones más rápidas y no destructivas de la calidad del producto [62].

La eficiencia y viabilidad de los tratamientos no térmicos en comparación con los térmicos revelan un panorama prometedor. Se ha indicado que el HPP puede retener hasta un 97% de vitamina C en jugos de frutas, en contraste con solo el 60-70% retenido después de la pasteurización térmica [62]. En este contexto, el HPP ha demostrado ser capaz de lograr reducciones de 5 log en patógenos como *Listeria monocytogenes* en productos cárnicos, cumpliendo con los estándares de seguridad alimentaria sin los efectos negativos del tratamiento térmico en la textura y el sabor [18]. Sin embargo, es importante advertir que la viabilidad de estas tecnologías debe considerarse en un contexto más amplio, teniendo en cuenta los costos iniciales de inversión más altos [38]. No obstante, se ha indicado que estos costos pueden compensarse con el tiempo debido a la mayor eficiencia energética y la menor pérdida de producto [39].

En lo que respecta a los resultados esperados de los tratamientos no térmicos, se ha demostrado que el HPP puede extender la vida útil de jugos de frutas hasta en un 50% más que la pasteurización térmica convencional [55]. De manera similar, se han reportado extensiones de vida útil de hasta el 100% en algunos productos cárnicos tratados con HPP [56]. Asimismo, se ha encontrado que el uso de parámetros de presión y temperatura más altos probablemente inactivó las enzimas en mayor medida y redujo más significativamente la cantidad de gérmenes, lo que resultó en un cambio mínimo en las características sensoriales [53]. Además, se ha observado que el HPP y los PEF pueden retener hasta el 95% de vitaminas sensibles al calor como la vitamina C. En contraste con los métodos térmicos, el plasma frío ha demostrado ser particularmente efectivo en la descontaminación superficial de frutas y verduras frescas, logrando reducciones significativas en patógenos sin afectar la calidad del producto [31]. Por último, se ha encontrado que el HPP tuvo un impacto positivo en la retención de compuestos bioactivos y la calidad nutricional de las coliflores, superando a los métodos de procesamiento térmico tradicionales [60].

V. CONCLUSIONES

Las tecnologías no térmicas se emergen como una solución innovadora para optimizar la preservación, inocuidad y calidad de alimentos. En este contexto, métodos como ultrasonido, SC-CO₂, HPEF, plasma frío, energía pulsada, criogenización y ozonización han evidenciado su efectividad al prolongar la vida útil y conservar las características organolépticas de los productos, particularmente los termosensibles. Estas técnicas presentan ventajas notables sobre los métodos térmicos convencionales, destacando una mayor retención de antioxidantes y una eficaz reducción microbiana. Si bien su implementación enfrenta retos como

elevados costos iniciales y complejidades en la escala industrial, los beneficios en cuanto a preservación de nutrientes y propiedades sensoriales los convierten en opciones atractivas para el sector alimentario. En consecuencia, la integración de estas tecnologías promete transformar el procesamiento de alimentos, garantizando, a pesar de los desafíos iniciales, productos más seguros, nutritivos y atractivos para el consumidor final. Además, futuras investigaciones deberían enfocarse en ampliar la aplicación de estas tecnologías a una variedad más extensa de productos, especialmente aquellos con estructuras complejas. Por último, investigar el impacto de estas tecnologías en la bioaccesibilidad de nutrientes y compuestos bioactivos es esencial para optimizar la calidad nutricional y sensorial de los alimentos

REFERENCIAS

- [1] Soleno Wilches, R. (2018). Non thermal technologies in the processing and conservation of vegetable foods. A review. *Revista Colombiana De Investigaciones Agroindustriales*, 2(1), 73–82. <https://doi.org/10.23850/24220582.172>
- [2] Allai, F.M.; Azad, Z.A.A.; Mir, N.A.; Gul, K. Recent Advances in Non-Thermal Processing Technologies for Enhancing Shelf Life and Improving Food Safety. *Applied Food Research* 2022, 100258. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100917>
- [3] Jadhav, H.; Choudhary, P. Emerging techniques for the processing of food to ensure higher food safety with enhanced food quality: a review, *Review* 2023. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00089-5>
- [4] Chiozzi, V.; Agriopoulou, S.; Varzakas, T. Advances, Applications, and Comparison of Thermal (Pasteurization, Sterilization, and Aseptic Packaging) against Non-Thermal (Ultrasounds, UV Radiation, Ozonation, High Hydrostatic Pressure) Technologies in Food Processing. *Appl. Sci.* 2022, 12, 2202. <https://doi.org/10.3390/app12042202>
- [5] Zhou, X.; Salazar, J.K.; Fay, M.L.; Zhang, W. Efficacy of Power Ultrasound-Based Hurdle Technology on the Reduction of Bacterial Pathogens on Fresh Produce. *Foods* 2023, 12, 2653. <https://doi.org/10.3390/foods12142653>
- [6] Hassoun A, Ojha S, Tiwari B, Rustad T, Nilsen H, Heia K, Cozzolino D, Bekhit AE-D, Biancolillo A, Wold JP. Monitoring Thermal and Non-Thermal Treatments during Processing of Muscle Foods: A Comprehensive Review of Recent Technological Advances. *Applied Sciences*. 2020; 10(19):6802. <https://doi.org/10.3390/app10196802>
- [7] Arya, S.S., Nachiappan, N., Waghmare, R. et al. Recent progress and future perspectives on non-thermal apple juice processing techniques. *Food Prod Process and Nutr* 5, 36 (2023). <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00149-w>
- [8] Seydi Yikmiş, Investigation of the Effects of Non-Thermal, Combined and Thermal Treatments on the Physicochemical Parameters of Pomegranate (*Punica granatum L.*) Juice, *Food Science and Technology Research*, 2019, Volume 25, Issue 3, Pages 341-350, Released on J-STAGE August 15, 2019, Online ISSN 1881-3984, Print ISSN 1344-6606 <https://doi.org/10.3136/fstr.25.341>
- [9] Schnabel, U., Handorf, O., Winter, H., Weihe, T., Weit, C., Schäfer, J., Stachowiak, J., Boehm, D., Below, H., Bourke, P., & Ehlbeck, J. (2021). The effect of plasma treated water unit processes on the food quality characteristics of fresh-cut endive. *Frontiers in Nutrition*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.627483>
- [10] Gombas, K. (2024). US food safety modernization act. In *Encyclopedia of Food Safety* (pp. 109–120). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822521-9.00123-4>

- [11] Soleno Wilches, R. (2015). Tecnologías no térmicas en el procesado y conservación de alimentos vegetales. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 2, 73. <https://doi.org/10.23850/24220582.172>
- [12] Tappi, S., Nissen, L., Casciano, F., Antonelli, G., Chiarello, E., Picone, G., Laurita, R., Capelli, F., Gherardi, M., Maccaferri, C., Gianotti, A., Bordoni, A., Espmark, Å. M., Capozzi, F., & Rocculi, P. (2023). Effect of cold plasma generated with different gas mixtures on safety, quality and nutritional aspects of fresh sea bream fillets. *Innovative Food Science & Emerging Technologies: IFSET: The Official Scientific Journal of the European Federation of Food Science and Technology*, 89(103477), 103477. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103477>
- [13] Yi, T., Fang, W., Xie, X., Yuan, B., Lu, M., & Xu, C. (2022). High pressure processing (HPP) improved safety and quality of emerging aronia berry juice: a pilot scale shelf-life study. *Journal of Food Science and Technology*, 59(2), 755–767. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05070-z>
- [14] Feng, X., Zhou, Z., Wang, X., Bi, X., Ma, Y., & Xing, Y. (2020). Comparison of high hydrostatic pressure, ultrasound, and heat treatments on the quality of strawberry–apple–lemon juice blend. *Foods (Basel, Switzerland)*, 9(2), 218. <https://doi.org/10.3390/foods9020218>
- [15] Alves, E., Castro, M., Saqueti, B., Manin, L., Alencar, J., Zacarias, J., Bruni, A., Madrona, G., Visentainer, J., Cristianini, M., Santos, O., & Visentainer, J. (2024). Impact of conservation processes on the lipid profile and immunological factors IL-10 and TGF- β 1 in whey separated from discarded human milk. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20230102>
- [16] Liao, Q., Tao, H., Li, Y., Xu, Y., & Wang, H.-L. (2021). Evaluation of structural changes and molecular mechanism induced by high hydrostatic pressure in *Enterobacter sakazakii*. *Frontiers in Nutrition*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.739863>
- [17] Ayyash, M., Abdalla, A., Abu-Jdayil, B., Huppertz, T., Bhaskaracharya, R., Al-Mardeai, S., Mairpady, A., Ranasinghe, A., & Al-Nabulsi, A. (2022). Rheological properties of fermented milk from heated and high pressure-treated camel milk and bovine milk. *Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology]*, 156(113029), 113029. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.113029>
- [18] Rajendran, S., Mallikarjunan, P. K., & O'Neill, E. (2022). High pressure processing for raw meat in combination with other treatments: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10). <https://doi.org/10.1111/jfpp.16049>
- [19] Yildiz, S., Pokhrel, P. R., Unluturk, S., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2021). Shelf life extension of strawberry juice by equivalent ultrasound, high pressure, and pulsed electric fields processes. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 140(110040), 110040. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110040>
- [20] Yildiz, S., Pokhrel, P. R., Unluturk, S., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2021). Shelf life extension of strawberry juice by equivalent ultrasound, high pressure, and pulsed electric fields processes. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 140(110040), 110040. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110040>
- [21] Tian, X., Yang, Y., Zhang, W., & Wang, Y. (2023). Effect of high hydrostatic pressure and thermal processing on the shelf life and quality attributes of apple-kiwi-carrot puree blend. *Journal of Food Quality*, 2023, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2023/1631285>
- [22] Shah, U., Ranieri, P., Zhou, Y., Schauer, C. L., Miller, V., Fridman, G., & Sekhon, J. K. (2019). Effects of cold plasma treatments on spot-inoculated *Escherichia coli* O157:H7 and quality of baby kale (*Brassica oleracea*) leaves. *Innovative Food Science & Emerging Technologies: IFSET: The Official Scientific Journal of the European Federation of Food Science and Technology*, 57(102104), 102104. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.12.010>
- [23] Gromov, D., Borisova, A., & Bakharev, V. (2021). Food allergens and methods for producing hypoallergenic foods. *ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ*, 51(2), 232–247. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-232-247>
- [24] Prokopenko, I. A. (2020). Research of functional and technological parameters of high pressure processed meat. *Theory and Practice of Meat Processing*, 5(1), 17–21. <https://doi.org/10.21323/2414-438x-2020-5-1-17-21>
- [25] Ceribeli, C., Otte, J., Walkling-Ribeiro, M., Cardoso, D. R., & Ahmé, L. M. (2023). Impact of non-thermal pasteurization technologies on vitamin B12 content in milk. *Innovative Food Science & Emerging Technologies: IFSET: The Official Scientific Journal of the European Federation of Food Science and Technology*, 84(103303), 103303. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103303>
- [26] Xing, Y., Ma, Q., Wang, K., Dong, X., Wang, S., He, P., Wang, J., & Xu, H. (2023). Non-thermal treatments of strawberry pulp: The relationship between quality attributes and microstructure. *Ultrasonics Sonochemistry*, 98(106508), 106508. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106508>
- [27] Hamanaka, D., Naka, M., & Arimura, K. (2021). Effect of the combination of high hydrostatic pressure and alkaline electrolyzed water on the reduction of heat resistance of bacterial spores. *Biocontrol Science*, 26(4), 193–199. <https://doi.org/10.4265/bio.26.193>
- [28] Harikrishna, S., Anil, P. P., Shams, R., & Dash, K. K. (2023). Cold plasma as an emerging nonthermal technology for food processing: A comprehensive review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14(100747), 100747. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100747>
- [29] Salihah, N. T., Hossain, M. M., Lubis, H., & Ahmed, M. U. (2016). Trends and advances in food analysis by real-time polymerase chain reaction. *Journal of Food Science and Technology*, 53(5), 2196–2209. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2205-0>
- [30] Hall, A. E., & Moraru, C. I. (2021). Effect of High Pressure Processing and heat treatment on in vitro digestibility and trypsin inhibitor activity in lentil and faba bean protein concentrates. *Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology]*, 152(112342), 112342. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112342>
- [31] López, M., Calvo, T., Prieto, M., Múgica-Vidal, R., Muro-Fraguas, I., Alba-Elías, F., & Alvarez-Ordóñez, A. (2019). A review on non-thermal atmospheric plasma for food preservation: Mode of action, determinants of effectiveness, and applications. *Frontiers in Microbiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00622>
- [32] Sharma, P., Oey, I., & Everett, D. W. (2014). Effect of pulsed electric field processing on the functional properties of bovine milk. *Trends in Food Science & Technology*, 35(2), 87–101. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.11.004>
- [33] Zhu, F. (2015). Interactions between starch and phenolic compound. *Trends in Food Science & Technology*, 43(2), 129–143. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.02.003>
- [34] Kheradia, A., & Warriner, K. (2013). Understanding the Food Safety Modernization Act and the role of quality practitioners in the management of food safety and quality systems. *The TQM Journal*, 25(4), 347–370. <https://doi.org/10.1108/17542731311314854>
- [35] Thinking about the future of food safety. (2022). FAO. <https://doi.org/10.4060/cb8667en>
- [36] Jansen, A. (2018). The Role of Codex Alimentarius in Ensuring Food Safety and Quality: Challenges and Opportunities. *Food Control*, 90, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.02.027>
- [37] 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>
- [38] Misra, N. N., Koubaa, M., Roohinejad, S., Juliano, P., Alpas, H., Inácio, R. S., ... & Barba, F. J. (2017). Landmarks in the historical development of twenty first century food processing technologies. *Food Research International*, 97, 318–339. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.05.001>
- [39] Pankaj, S. K., & Keener, K. M. (2017). A review and research trends in alternate frying technologies. *Current Opinion in Food Science*, 16, 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.09.001>
- [40] Li, L., Yang, R., & Zhao, W. (2021). The effect of pulsed electric fields (PEF) combined with temperature and natural preservatives on the quality and microbiological shelf-life of cantaloupe juice. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(11), 2606. <https://doi.org/10.3390/foods10112606>
- [41] Renes, E., Fernández, A., Fernández, D., López, M., & Álvarez-Ordóñez, A. (2020). Effect of high hydrostatic pressure processing of milk on the quality characteristics of kefir. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(10). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14797>
- [42] Rigdon, M., Thippareddi, H., Thomas, C. L., Kumar, S., McKee, R. W., & Stelzleni, A. M. (2023). High-pressure processing helps meet the *Escherichia coli* O157:H7 and Shiga toxin-producing *E. coli* (STEC)

- performance standards for beef summer sausage. *Meat and Muscle Biology*, 7(1). <https://doi.org/10.22175/mmb.16076>
- [43] Liu, D., Zhou, N., Sanmartin, C., Ying, X., Brennan, C., Xiao, G., Ma, L., & Li, L. (2023). Low-pressure plasma treatment increased the quality and characteristic flavor of lyophilized lemon slices. *Journal of Food Biochemistry*, 2023, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2023/1215791>
- [44] Alinovi, M., Bancalari, E., Martelli, F., Cirlini, M., & Rinaldi, M. (2021). Stabilization of *Arthrospira platensis* with high-pressure processing and thermal treatments: Effect on physico-chemical and microbiological quality. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(11). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15912>
- [45] García-Alonso, A., Alvarado López, A. N., & Redondo-Cuenca, A. (2024). Effect of high hydrostatic pressure and thermal treatment on polyphenolic compounds and the antioxidant capacity of *Phaseolus coccineus* L. *Cereal Chemistry*, 101(4), 750–758. <https://doi.org/10.1002/cche.10776>
- [46] Mbye, M., Ayyash, M., Mohamed, H., Abu-Jdayil, B., Kamleh, R., & Kamal-Eldin, A. (2023). Effects of ultrafiltration followed by heat or high-pressure treatment on camel and bovine milk cheeses. *NFS Journal*, 31, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2023.04.004>
- [47] Sarwar, S., Netzel, G., Netzel, M. E., Mereddy, R., Phan, A. D. T., Hong, H. T., Cozzolino, D., & Sultanbawa, Y. (2021). Impact of curcumin-mediated photosensitization on fungal growth, physicochemical properties and nutritional composition in Australian grown strawberry. *Food Analytical Methods*, 14(3), 465–472. <https://doi.org/10.1007/s12161-020-01896-z>
- [48] Shkolnikov Lozober, H., Okun, Z., Parvari, G., & Shpigelman, A. (2023). The effect of storage and pasteurization (thermal and high-pressure) conditions on the stability of phycocyanobilin and phycobiliproteins. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 12(3), 568. <https://doi.org/10.3390/antiox12030568>
- [49] Marengo-Orozco, C., Tarazona-Díaz, M. P., & Rodríguez, L. I. (2020). Formulation of a tropical beverage by applying heat treatment and high hydrostatic pressure. *Food Technology and Biotechnology*, 58(3), 239–248. <https://doi.org/10.17113/ftb.58.03.20.6459>
- [50] Ambreen, S., Arshad, M. U., Imran, A., Afzaal, M., & Madilo, F. K. (2023). A comparative study of high-pressure processing and thermal processing techniques on characteristics and microbial evaluation of orange juice. *International Journal of Food Properties*, 26(2), 3214–3225. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2271678>
- [51] Burducea, I., Burducea, C., Mereuta, P.-E., Sirbu, S.-R., Iancu, D.-A., Istrati, M.-B., Straticiu, M., Lungoci, C., Stoleru, V., Teliban, G.-C., Robu, T., Burducea, M., & Nastuta, A. V. (2023). Helium atmospheric pressure plasma jet effects on two cultivars of *Triticum aestivum* L. *Foods (Basel, Switzerland)*, 12(1), 208. <https://doi.org/10.3390/foods12010208>
- [52] Tenuta, M. C., Artoni, E., Fava, P., Bignami, C., & Licciardello, F. (2023). Shelf life extension and nutritional quality preservation of sour cherries through high pressure processing. *Foods (Basel, Switzerland)*, 12(2), 342. <https://doi.org/10.3390/foods12020342>
- [53] Salamon, B., Zakariás, F., Csehi, B., Kiskó, G., & Dalmadi, I. (2021). Different sequence of high-hydrostatic pressure and mild-heat treatment on the colour and sensory characteristics of strawberry puree. *Acta Alimentaria*, 50(1), 93–101. <https://doi.org/10.1556/066.2020.00165>
- [54] Ben-Fadhel, Y., Perreault, V., Marciniak, A., Gaillard, R., Pouliot, Y., Brisson, G., & Doyen, A. (2024). Effect of high-hydrostatic pressure on the digestibility of egg yolk and granule. *Journal of Food Science*, 89(5), 2803–2813. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17051>
- [55] Li, Y., & Padilla-Zakour, O. I. (2021). High pressure processing vs. Thermal pasteurization of whole Concord grape puree: Effect on nutritional value, quality parameters and refrigerated shelf life. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(11), 2608. <https://doi.org/10.3390/foods10112608>
- [56] Bi, X., Zhou, Z., Qin, T., Wang, X., Ma, Y., Xing, Y., & Che, Z. (2020). Effects of high pressure processing (HPP) on microorganisms and the quality of mango smoothies during storage. *RSC Advances*, 10(52), 31333–31341. <https://doi.org/10.1039/d0ra05181k>
- [57] Salve, A. R., Pegu, K., & Arya, S. S. (2019). Comparative assessment of high-intensity ultrasound and hydrodynamic cavitation processing on physico-chemical properties and microbial inactivation of peanut milk. *Ultrasonics Sonochemistry*, 59(104728), 104728. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104728>
- [58] Ding, Y., Xiao, Y., Ouyang, Q., Luo, F., & Lin, Q. (2021). Modulating the in vitro digestibility of chemically modified starch ingredient by a non-thermal processing technology of ultrasonic treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70(105350), 105350. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105350>
- [59] Shabbir, M. A., Ahmed, H., Maan, A. A., Rehman, A., Afraz, M. T., Iqbal, M. W., Khan, I. M., Amir, R. M., Ashraf, W., Khan, M. R., & Aadil, R. M. (2021). Effect of non-thermal processing techniques on pathogenic and spoilage microorganisms of milk and milk products. *Food Science and Technology*, 41(2), 279–294. <https://doi.org/10.1590/fst.05820>
- [60] Kurek, M. A., Finnseth, C., Skipnes, D., & Rode, T. M. (2022). Impact of High-Pressure Processing (HPP) on Selected Quality and Nutritional Parameters of Cauliflower (*Brassica oleracea* var. *Botrytis*). *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 12(12), 6013. <https://doi.org/10.3390/app12126013>
- [61] Ozkan, G., Stübler, A.-S., Aganovic, K., Draeger, G., Esatbeyoglu, T., & Capanoglu, E. (2022). A comparative study on physicochemical properties and in vitro bioaccessibility of bioactive compounds in rosehip (*Rosa canina* L.) infusions treated by non-thermal and thermal treatments. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(6). <https://doi.org/10.1111/jfpp.16096>
- [62] Esposto, S., Veneziani, G., Taticchi, A., Urbani, S., Selvaggini, R., Sordini, B., Daidone, L., Gironi, G., & Servili, M. (2021). Chemical composition, antioxidant activity, and sensory characterization of commercial pomegranate juices. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 10(9), 1381. <https://doi.org/10.3390/antiox10091381>
- [63] Caballero-Figueroa, E., Terrés, E., Hernández-Hernández, H. M., & Escamilla-García, M. (2022). Revisión sobre las tecnologías emergentes no térmicas para el procesamiento de alimentos. *Tip Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 25. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.459>
- [64] Moreno-Vilet, L.; Hernández-Hernández, H.M.; Villanueva-Rodríguez, S.J. (2018). Current status of emerging food processing technologies in Latin America: Novel thermal processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, (), S1466856418301978. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.06.013>
- [65] Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Roobab, U., Munir, M. A., Naderipour, A., Qureshi, M. I., El-Din Bekhit, A., Liu, Z. W., & Aadil, R. M. (2021). Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing. *Trends in Food Science and Technology*, 111, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.041>
- [66] 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>
- [67] Ekezie, F. C., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2018). Effects of nonthermal food processing technologies on food allergens: A review of recent research advances. *Trends in Food Science and Technology*, 74, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.01.007>
- [68] 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 and Emerging Technologies*, 58, 102233. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102233>
- [69] Li, X., & Farid, M. (2016). A review on recent developments in non-conventional food sterilization technologies. *Journal of Food Engineering*, 182, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.02.026>
- [70] Gokul Nath, K., Pandiselvam, R., & Sunil, C. K. (2023). High-pressure processing: Effect on textural properties of food- A review. *Journal of Food Engineering*, 351(111521), 111521. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111521>
- [71] Houška, M., Silva, F.V.M., Evelyn, R., Buckow, R., Terefe, N.S., & Tonello, C. (2022). High Pressure Processing Applications in Plant Foods. *Foods*, 11, 223. <https://doi.org/10.3390/foods11020223>