

9. Tecnologías no térmicas en alimentos: Innovación para una industria verde y sostenible



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.09>

ILSE MONROY RODRÍGUEZ*

JOSÉ IRVING VALDEZ MIRANDA**

ANDREA PATRICIA CUEVAS GÓMEZ***

RAÚL EDUARDO LÓPEZ HERNÁNDEZ****

Resumen

El uso de tecnologías no térmicas en la industria alimentaria es una estrategia clave para avanzar hacia un sistema sostenible y eficiente. En un contexto donde la demanda de alimentos seguros y nutritivos crece junto con la necesidad de reducir el impacto ambiental, estas tecnologías ofrecen soluciones innovadoras. Su aplicación permite reducir el consumo energético y la generación de residuos, conservando la calidad sensorial y nutricional de los alimentos al evitar la aplicación de altas temperaturas que pueden degradar compuestos bioactivos. En la ciencia y tecnología de alimentos, el ultrasonido, las altas presiones hidrostáticas y campos electrostáticos de alto voltaje han demostrado ser herramientas eficaces para asegurar la calidad microbiológica, prolongar la vida útil y conservar/mejorar propiedades funcionales. Su integración en la industria no sólo responde a exigencias regu-

* Doctora en Ciencias en Alimentos. Profesora-investigadora de tiempo completo en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5042-4966> ; correo electrónico: ilse.monroy.r@gmail.com

** Doctor en Ciencias en Alimentos. Profesor en la Universidad Insurgentes, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6703-0568>

*** Doctora en Ciencias en Alimentos por el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6010-4720>

**** Doctor en Ciencias en Alimentos por el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9738-7026>

latorias y comerciales, sino que también impulsa la competitividad del sector al alinearse con principios de sustentabilidad e innovación. En este capítulo se explorarán las ventajas ambientales, nutricionales y económicas de estas tecnologías, así como su papel en la transición hacia una producción alimentaria más responsable en México.

Palabras clave: *tecnologías no térmicas, industria alimentaria, seguridad alimentaria.*

Introducción a las tecnologías no térmicas

La alimentación consciente y una producción sostenible contribuyen significativamente a un estilo de vida saludable y a la mejora en la calidad de vida de las personas. En este contexto, el desarrollo de productos alimentarios mínimamente procesados que contengan un alto valor nutrimental se ha consolidado como una estrategia clave para el futuro del sector alimentario (Acosta et al., 2024). Problemas como el desperdicio de alimentos, la hambruna y la desnutrición representan desafíos globales que demandan soluciones efectivas. Garantizar el acceso a una alimentación completa, equilibrada, segura, suficiente, variada y adecuada es fundamental para promover el bienestar humano y avanzar hacia sistemas alimentarios más equitativos (Acosta et al., 2024; Bermejo et al., 2023; López-Pedrouso et al., 2019).

Cada año, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) lidera múltiples proyectos y estrategias orientadas a erradicar el hambre y fortalecer la seguridad alimentaria y nutricional; de acuerdo con su informe más reciente, se estima que entre 713 y 757 millones de personas, equivalente al 8.9-9.4% de la población mundial enfrentaron condiciones de hambruna en 2023, lo que representa un incremento de aproximadamente 152 millones de personas, en comparación con 2019 (FAO, 2024).

En México, se estiman más de 20 millones de toneladas de alimentos al año desperdiciados, suficientes para alimentar a 25 millones de personas (Astudillo-Suárez, 2025). Estos alimentos podrían alimentar, durante semanas, a los 7.4 millones de personas que actualmente viven en condiciones

de pobreza extrema y carencia alimentaria. La reducción del desperdicio alimentario, que representa aproximadamente un tercio de los alimentos producidos a nivel global y la disminución de su impacto ambiental sobre el medio ambiente, son condiciones necesarias para avanzar hacia un modelo de economía circular que fomente un uso justo, responsable y sostenible de los recursos (Fanzo et al., 2021; Hassoun et al., 2022). En este marco, la innovación tecnológica en el procesamiento de alimentos, incluyendo el uso de tecnologías emergentes, se vuelve indispensable. Las alternativas alimentarias que logren un equilibrio entre calidad nutricional, salud humana y sostenibilidad ambiental deben alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), promoviendo innovaciones que transformen la cadena de valor del sector alimentario (Bermejo et al., 2023).

Actualmente, las tecnologías térmicas convencionales continúan siendo fundamentales para el procesamiento, almacenamiento y preservación de alimentos. Métodos como la pasteurización y la esterilización, que emplean temperaturas elevadas, han demostrado eficacia en la eliminación de patógenos; no obstante, también presentan desventajas como alteraciones en el color, deterioro del valor nutricional y pérdida de características sensoriales, lo que ha impulsado la búsqueda de tecnologías alternativas, como las no térmicas (Caballero-Figueroa et al., 2022).

Entre las tecnologías no térmicas aplicadas al procesamiento de alimentos se destacan el ultrasonido, las altas presiones hidrostáticas (*high pressure processing*, [HPP]) y los campos electrostáticos de alto voltaje (CEAV). Estas tecnologías han demostrado ser efectivas en el procesamiento de una amplia variedad de alimentos, como carnes, huevos, pescados, mariscos, productos lácteos, frutas y hortalizas (López-Pedrouso et al., 2019; Safwa et al., 2024).

Principales tecnologías no térmicas aplicadas en alimentos

Ultrasonido

La tecnología de ultrasonido se basa en el uso de ondas sonoras de alta frecuencia, típicamente superiores a los 20 kHz, que se transmiten a través

de medios líquidos o sólidos (Kumar et al., 2021). Estas ondas generan ciclos alternos de compresión y rarefacción, que inducen la formación de microburbujas o cavidades en el líquido. Este fenómeno, conocido como cavitación acústica, culmina con el colapso de burbujas, generando microjets, un aumento de temperatura y presión localizada, lo cual origina efectos físicos, químicos y biológicos significativos en los alimentos (Li et al., 2023). Entre los principales efectos inducidos por el ultrasonido se encuentran la mejora de la transferencia de calor y masa (Perera y Alzahrani, 2021).

El éxito de la aplicación del ultrasonido en la industria alimentaria depende de la adecuada selección y control de parámetros operativos. Los más relevantes incluyen la frecuencia (kHz), potencia (W/cm^2), intensidad, duración del tratamiento, temperatura y tipo de medio (líquido, sólido o mezcla). Cada uno de estos factores influye directamente en la eficiencia del proceso, la calidad del producto final y los efectos deseados (Mgoma et al., 2025).

Estudios recientes han demostrado que la combinación de ultrasonidos con otros procesos tecnológicos puede incrementar la eficiencia energética y reducir el tiempo de procesamiento, contribuyendo a prácticas más sostenibles (Li et al., 2023; Soquetta et al., 2018).

Aplicaciones y ventajas del ultrasonido en la industria de alimentos

Las aplicaciones del ultrasonido en la industria de alimentos son amplias, algunas de ellas se resumen en la figura 9.1. Entre sus principales aplicaciones, destaca la extracción de compuestos funcionales, en la que el ultrasonido facilita la ruptura de las paredes celulares de matrices vegetales, favoreciendo la liberación de flavonoides, compuestos fenólicos, carotenoides y otros compuestos antioxidantes (Chemat et al., 2017). Esta técnica es especialmente útil para obtener extractos con alta actividad biológica a partir de residuos agroindustriales, contribuyendo así a la valorización de subproductos y al aprovechamiento integral de materias primas (Pattnaik et al., 2021).

Figura 9.1. Aplicaciones de la tecnología de ultrasonido en la industria de alimentos



Fuente: Mgoma et al. (2025).

En cuanto a la conservación de alimentos, el ultrasonido se emplea para la inactivación microbiana y enzimática, sobre todo en combinación con tratamientos a baja temperatura. Esta estrategia permite extender la vida útil de los productos sin comprometer sus características sensoriales ni su valor nutricional (Pattnaik et al., 2021).

Aunado a lo anterior, destaca el ahorro de tiempo en procesos como el secado y la fermentación. En el caso del secado, el ultrasonido se utiliza como pretratamiento, lo que permite reducir significativamente el tiempo de operación y mejorar la retención de nutrientes, color y textura. En fermentaciones, su aplicación en etapas iniciales puede estimular la actividad de microorganismos beneficiosos, acortando los tiempos necesarios para alcanzar el perfil deseado en productos como yogur, kéfir o kombucha (Qian et al., 2023).

El ultrasonido también se emplea en la elaboración de mezclas, facilitando la formación de emulsiones estables, lo cual es especialmente valioso en productos como aderezos, bebidas funcionales y alimentos lácteos. Además, permite mejorar la textura de productos tipo espuma, geles y emulsiones mediante la modificación de las interacciones moleculares (Qayum et al., 2023).

Desde una perspectiva sostenible, esta tecnología posibilita la recuperación de nutrientes en residuos, como fibras dietéticas o proteínas hidrolizadas, contribuyendo al desarrollo de ingredientes funcionales con valor agregado. Asimismo, se ha reportado su efectividad en la eliminación de contaminantes como pesticidas y compuestos químicos residuales en frutas, vegetales y cereales, mejorando la seguridad de los alimentos. Finalmente, el ultrasonido tiene aplicaciones en el análisis y control de calidad, al facilitar evaluaciones no destructivas de propiedades físicas y estructurales (Bhatia et al., 2024).

El ultrasonido representa una tecnología no térmica con amplio potencial en la industria alimentaria. Sus múltiples aplicaciones permiten mejorar la eficiencia de los procesos, preservar la calidad de los productos, y valorizar residuos agroindustriales, todo ello bajo un enfoque sostenible y alineado con las demandas de una industria alimentaria más verde e innovadora (Bhatia et al., 2024).

Altas presiones

El procesamiento por altas presiones (*high pressure processing*, [HPP]) es una tecnología no térmica aplicada en la industria alimentaria para mejorar la seguridad microbiológica, conservar compuestos bioactivos y extender la vida útil de los productos sin comprometer sus propiedades nutricionales y sensoriales (Patel et al., 2015). Esta técnica utiliza presiones hidrostáticas uniformes entre 300 y 600 MPa sobre alimentos previamente envasados, transmitidas de forma isostática en todas las direcciones, lo cual preserva la integridad estructural del alimento (Betoret et al., 2015). A diferencia de los métodos térmicos tradicionales, el procesamiento HPP minimiza la degradación de nutrientes sensibles al calor, reduciendo la necesidad de conservadores químicos y promoviendo prácticas sostenibles acordes con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, como el ODS 3 (salud y bienestar) y el ODS 12 (producción y consumo responsables) (Amjad et al., 2025).

Los efectos de la presión incluyen la desnaturalización de proteínas, la ruptura de membranas celulares, la gelificación de matrices y la estabilización de emulsiones, generando productos seguros y con mejores texturas

(Betoret et al., 2015). Existen diferentes variantes de esta tecnología según la aplicación deseada: HPP (sistema convencional con agua como medio transmisor), UHPH (*ultrahigh pressure homogenization*), que combina presión extrema con homogeneización para mejorar la estabilidad de emulsiones, y HPJ (*high pressure jet*), un tratamiento superficial eficaz para la descontaminación de frutas, vegetales o superficies de contacto (Amjad et al., 2025; Betoret et al., 2015). La elección del tipo de tratamiento dependerá del objetivo específico y de la naturaleza de la matriz alimentaria.

Aplicaciones y ventajas ambientales de la tecnología por altas presiones en la industria de alimentos

Las aplicaciones de la tecnología por altas presiones son versátiles y abarcan diversos sectores de la industria alimentaria. En productos lácteos, como leche, yogures y quesos frescos, se ha demostrado su efectividad para prolongar la vida útil y mantener una calidad sensorial aceptable. La HPP es capaz de eliminar la carga microbiana sin afectar significativamente la actividad enzimática o la concentración de compuestos bioactivos, lo cual representa una ventaja competitiva frente a la pasteurización térmica (Komora et al., 2020).

En el sector cárnico, esta tecnología permite la reducción de bacterias patógenas como *Listeria monocytogenes* y *Salmonella* spp., manteniendo la textura y el color de carnes frescas, cocidas o curadas (Komora et al., 2020). Asimismo, en vegetales y frutas mínimamente procesadas, la HPP conserva características de frescura, color y firmeza, elementos importantes para la aceptación del consumidor. Además, se ha reportado el uso de esta tecnología para la extracción de compuestos de interés a partir de subproductos, lo cual fortalece su papel en procesos de valorización y sostenibilidad (Amjad et al., 2025).

La implementación del procesamiento por altas presiones en la industria alimentaria representa un avance importante hacia modelos de producción más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente (Batty et al., 2019). Esta tecnología permite reducir significativamente la dependencia de métodos convencionales que implican un alto consumo energético o el uso intensivo

de aditivos químicos. En la figura 9.2, se ilustran de manera esquemática las principales ventajas ambientales y sostenibles asociadas a la HPP.

Figura 9.2. Ventajas ambientales de la tecnología por altas presiones en la industria alimentaria



Fuente: Safwa et al. (2024).

En primer lugar, la HPP permite el menor uso de aditivos alimentarios, particularmente conservadores, gracias a su eficacia para inactivar microorganismos patógenos y deteriorativos. Esto favorece el desarrollo de productos más naturales y seguros (Inácio et al., 2014). A la vez, al disminuir el desperdicio alimentario mediante el alargamiento de la vida útil, se contribuye a reducir pérdidas económicas y ambientales relacionadas con el deterioro de alimentos (Amjad et al., 2025). Otra ventaja relevante es el ahorro energético, ya que el tratamiento puede realizarse a temperatura ambiente o en frío, con un consumo relativamente bajo en comparación con procesos térmicos prolongados. Además, la HPP favorece la conservación de nutrientes y propiedades sensoriales, lo cual incrementa el valor nutricional y la aceptación del producto final por parte del consumidor (Betoret et al., 2015). Finalmente, su compatibilidad con otras tecnologías verdes, como microon-

das o pulsos eléctricos, amplía las posibilidades de diseño de procesos sinérgicos, más eficientes y sostenibles (Munir et al., 2020).

En conjunto, estas características consolidan al HPP como una herramienta clave para fortalecer la economía circular en el sector alimentario, al mismo tiempo que promueve prácticas responsables alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. El uso creciente de esta tecnología evidencia su impacto positivo en la salud pública, la economía circular y la eficiencia del procesamiento alimentario, consolidándose como una herramienta clave para una industria más verde y sostenible (Roman et al., 2017).

Campo electrostático de alto voltaje

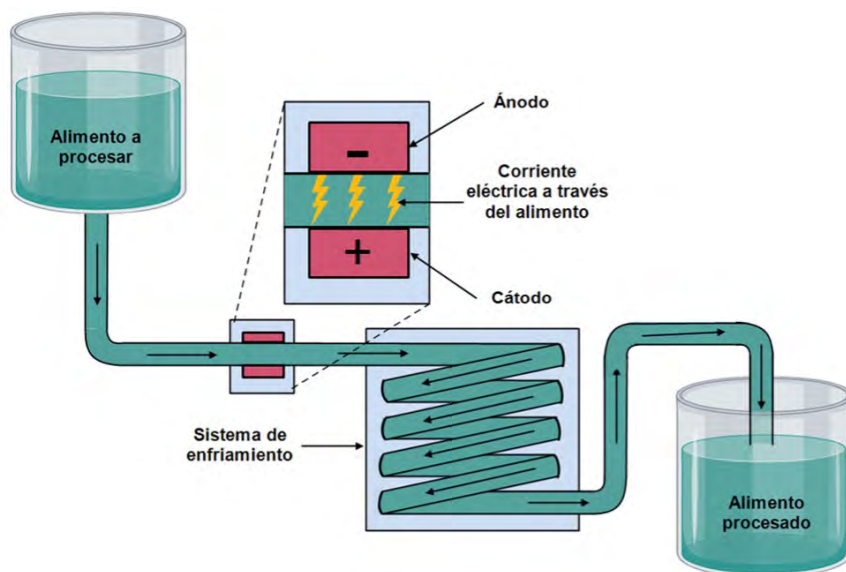
La tecnología de Campo Electrostático de Alto Voltaje (CEAV) se ha convertido en un novedoso método no térmico con un gran potencial para la conservación, descongelación y congelación de alimentos. Esta técnica evita las desventajas de los métodos tradicionales, como la resistencia a los antibióticos, los residuos tóxicos, los daños a estructuras y compuestos bioactivos por efecto térmico, lo que la hace especialmente adecuada para alimentos termosensibles (Qi et al., 2022; Yan et al., 2020). El CEAV funciona modificando la actividad de las enzimas (Valdez-Miranda, Robles-López et al., 2024) e induciendo cambios estructurales en las células microbianas (Huang et al., 2022; Qi et al., 2022), preservando así la calidad y garantizando la inocuidad.

Un campo eléctrico se presenta cuando dos objetos con diferentes cargas eléctricas se encuentran cerca una de la otra. Además, en la naturaleza, los campos eléctricos pueden formarse alrededor de cualquier objeto que tenga una carga eléctrica en relación con su entorno (Wang et al., 2009). Empíricamente se puede observar que objetos con diferentes cargas eléctricas se atraen a través de un espacio cercano, y cuando se tienen cargas iguales éstas se repelen, y estas fuerzas se propagan a través del espacio (campo) (Reitz et al., 1993). Michael Faraday (1850) describió estas fuerzas como líneas en el espacio (figura 9.3a).

Los campos eléctricos se han utilizado de diversas formas, principalmente como Campo Eléctrico Pulsado (CEP), el cual ha demostrado que

puede prolongar la vida útil de diversos alimentos líquidos mediante la inhibición de microorganismos patógenos y la reducción del deterioro de los alimentos y en alimentos sólidos, al lograr alteraciones que pueden conducir a modificaciones estructurales deseadas o mejorar el proceso de extracción de compuestos bioactivos (Arshad et al., 2021). En esta tecnología se hace pasar una corriente eléctrica a través del alimento en forma de pulsos, debido a esto el CEP favorece a los alimentos con alta conductividad eléctrica ya que la corriente eléctrica fluye de mejor manera a través de éstos. Sin embargo, esta tecnología tiene como desventaja que la temperatura del alimento incrementa debido al efecto Joule y pulsos de alta duración resulta en un mayor incremento significativo de la temperatura, debido a esto, durante la aplicación de los CEP se debe implementar un sistema de enfriamiento (Cavalcanti et al., 2023) como se muestra en la figura 9.3b.

Figura 9.3. Representación esquemática de las tecnologías que hacen uso del campo eléctrico.
a) Campo eléctrico de alto voltaje (las líneas entre los electrodos representan las fuerzas del campo eléctrico). b) Campo eléctrico pulsado



Fuente: Gabrić et al. (2018).

Por otro lado, el CEAV es un proceso de bajo costo y bajo consumo de energía. Una de las ventajas más importantes de esta tecnología es que durante su aplicación no hay incrementos significativos de temperatura (Dalvi-Isfahan et al., 2023), debido a que no hay corriente eléctrica a través del alimento. Por lo tanto, no necesita un sistema de enfriamiento (figura 9.3). La eficacia antibacteriana del CEAV se atribuye a su capacidad de dañar directamente las membranas celulares microbianas, provocando cambios en la permeabilidad, ruptura y desintegración, lo cual finalmente conduce a un crecimiento lento o a la muerte de las células bacterianas (Huang et al., 2022). Por ejemplo, se ha demostrado que el tratamiento con CEAV inhibe a *Staphylococcus aureus* (Qi et al., 2022) y *Acinetobacter johnsonii* mediante la disrupción de membranas (Huang et al., 2022). Además, el CEAV modifica la actividad de las enzimas que degradan los alimentos al inducir la reorganización de sus estructuras secundarias y terciarias, lo que provoca la deformación e inactivación de las mismas (Yan et al., 2020). Estos mecanismos contribuyen a una mayor vida útil y una mejor seguridad microbiana, sin comprometer las cualidades nutricionales y sensoriales de los alimentos.

Aplicaciones y ventajas del campo electrostático de alto voltaje en la industria de alimentos

La tecnología de CEAV se ha aplicado con éxito para conservar frutas y verduras, incluyendo tomates cherry (Zhao et al., 2023), espinacas (Li et al., 2023), ciruelas (Lu et al., 2024), plátanos (Valdez-Miranda, Robles-López et al., 2024), champiñones (Yan et al., 2020), brócoli, zanahorias, granadas, fresas, jujube (Valdez-Miranda, Guitiérrez-López et al., 2024), entre otras. Estudios recientes demuestran que el tratamiento con CEAV retrasa la pérdida de nutrientes, aumenta la dureza, mejora la capacidad antioxidante, reduce la pérdida de peso y los cambios de color, disminuye la carga microbiana y mantiene una mejor microestructura durante el almacenamiento (Zhao et al., 2023). Además, el CEAV induce estrés abiótico en los alimentos, promoviendo la acumulación de compuestos benéficos para la salud como carotenoides y compuestos fenólicos, manteniendo al mismo tiempo la frescura y la seguridad (Valdez-Miranda, Guitiérrez-López et al., 2024).

En comparación con las técnicas de conservación convencionales, la tecnología de CEAV ofrece diversas ventajas notables. Minimiza el consumo de energía, lo que la convierte en una alternativa energéticamente eficiente (Zhao et al., 2023). Al ser un proceso no térmico, el CEAV previene la degradación térmica, lo que lo hace especialmente adecuado para productos sensibles a la temperatura (Yan et al., 2020). Además, el CEAV demuestra una retención de calidad superior al preservar mejor la microestructura, los atributos sensoriales y los componentes nutricionales en comparación con los métodos tradicionales (Yan et al., 2020; Zhao et al., 2023). Estas ventajas posicionan al CEAV como una solución altamente efectiva y versátil para los desafíos modernos de la conservación de alimentos.

Más allá de la conservación, el CEAV también se ha explorado para aplicaciones de descongelación y congelación. Al influir en la organización y actividad molecular, el CEAV altera las características de conducción, difusión y flujo del calor, facilitando la fusión eficiente de los cristales de hielo (Xie et al., 2025). Esta tecnología también se ha utilizado para congelar camarones (Liu et al., 2023), descongelar lichis (Xie et al., 2025) y filetes de cerdo (Hu et al., 2021), y conservación de carne fresca durante el periodo de post mortem temprano (Xu et al., 2024). La tabla 9.1 presenta una comparación detallada entre algunas tecnologías no térmicas (US, HPP y CEAV) utilizadas en el procesamiento de alimentos.

Tabla 9.1. Comparación de tecnologías no térmicas en la industria alimentaria

Tecnología	Principio de funcionamiento	Parámetros de control	Aplicaciones principales en alimentos	Ventajas	Referencias
Ultrasonido (US)	Ondas acústicas que generan cavitación en medios líquidos o sólidos.	Frecuencia (20-100 kHz), potencia (W/cm²), tiempo de exposición, temperatura.	Extracción de compuestos funcionales, conservación, secado, fermentación, emulsificación y limpieza de equipamiento.	Procesamiento más rápido, preservación sensorial y nutricional, recuperación de compuestos, menor consumo energético.	Kumar et al. (2021), Li et al. (2023), Chemat et al. (2017), Qian et al. (2023), Bhatia et al. (2024).

<i>Tecnología</i>	<i>Principio de funcionamiento</i>	<i>Parámetros de control</i>	<i>Aplicaciones principales en alimentos</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Referencias</i>
Procesamiento a altas presiones (HPP).	Aplicación uniforme de presión isostática, sobre alimentos envasados.	Presión (300-600 MPa), tiempo de retención, temperatura, tipo de producto.	Conservación de lácteos, carnes, frutas, vegetales; Inactivación microbiana y enzimática.	Conserva textura y nutrientes, extiende vida útil, compatible con envases, menor uso de aditivos.	Patel et al. (2015), Knorr et al. (2020), Amjad et al. (2025), López-Quiroga et al. (2023).
Campo electrostático de alto voltaje (CEAV).	Aplicación de campos eléctricos de alto voltaje sobre alimentos.	Intensidad de campo (1-6 kV·cm ⁻¹ aprox. dependiendo del alimento), tiempo (min) y frecuencia (Hz).	Conservación, congelación/ descongelación, estrés abiótico, desinfección en frutas, verduras y productos cárnicos y del mar.	Inhibición microbiana y enzimática, preserva textura, conservación de compuestos termolábiles, eficiencia energética y prolonga la frescura sin aditivos químicos.	He et al. (2016), Huang et al. (2022), Liu et al. (2023), Lotfi et al. (2022), C. Xu et al. (2022), Y. Xu et al. (2024), Yan et al. (2020).

Fuente: elaboración propia.

Ventajas en el impacto ambiental y propiedades nutricionales de alimentos producidos por tecnologías verdes

La sostenibilidad se ha convertido en una prioridad estratégica para la industria alimentaria, no sólo por la presión ejercida por las políticas climáticas globales, sino también por la creciente demanda de consumidores conscientes del impacto ambiental de los productos que consumen (Rabbi y Amin, 2024). La producción y el procesamiento de alimentos deben evolucionar hacia tecnologías más eficientes, sostenibles y responsables con el medio ambiente, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente aquellos relacionados con acciones contra el cambio climático y la producción y consumo responsables (United Nations General Assembly, 2015).

En este contexto, la industria alimentaria ha comenzado a implementar estrategias dirigidas a la reducción del consumo energético, el aprovecha-

miento de subproductos, el desarrollo de empaques biodegradables y la adopción de procesos tecnológicos más limpios a lo largo de la cadena de producción. Estas acciones son fundamentales para disminuir el impacto ambiental sin comprometer la calidad e inocuidad de los alimentos (Karwacka et al., 2022; Punthi et al., 2022).

Uno de los principales retos actuales de la industria alimentaria es disminuir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), especialmente el dióxido de carbono (CO_2), debido a su estrecha relación con el calentamiento global (Shabir et al., 2023). En 2018, se estimó que el sistema alimentario fue responsable de aproximadamente un tercio de las emisiones globales de GEI, siendo el procesamiento industrial de alimentos el responsable de cerca de 0.5 gigatoneladas de CO_2 -eq (Tubiello et al., 2021). Estas emisiones provienen principalmente del uso de combustibles fósiles en procesos térmicos tradicionales como la pasteurización, esterilización y secado, así como de la demanda eléctrica de las operaciones industriales (Shabir et al., 2023).

La huella de carbono (HC) de un alimento puede estimarse a partir de la cantidad y tipo de energía utilizada durante su procesamiento. No sólo es relevante la cantidad de energía empleada, sino también identificar su origen, es decir, si proviene de fuentes renovables o de combustibles fósiles, ya que esto tendrá incidencia en su impacto ambiental; dos tecnologías con igual demanda energética pueden generar huellas de carbono muy distintas dependiendo de la fuente de energía (Allegretti et al., 2022). Otros factores que afectan el consumo energético incluyen el número de etapas de procesamiento, la preparación de las materias primas y la duración de la operación. Mientras más prolongado sea un proceso se requiere más energía (Karwacka et al., 2022).

Chemat et al. (2017) señalaron que el consumo energético de la ultrasonificación, que varía entre 0.1 y 0.3 kWh/kg, es significativamente menor al de la pasteurización convencional, que se sitúa entre 0.5 y 1.2 kWh/kg. Esta diferencia se asocia a los breves tiempos de procesamiento y a la ausencia de etapas de calentamiento. Como resultado, la ultrasonificación genera menos emisiones de carbono, con valores estimados entre 0.05 y 0.1 kg CO_2 -eq/kg, frente a los 0.2 a 0.4 kg CO_2 -eq/kg del tratamiento térmico (Younis et al., 2025).

Diversos estudios han evaluado cuantitativamente la huella ambiental de tecnologías convencionales frente a alternativas emergentes de carácter no térmico. Arnal et al. (2018) investigaron el impacto del uso de CEP como tecnología auxiliar en el proceso de pelado de tomates. Al implementar CEP en lugar del proceso convencional con vapor, se logró reducir el consumo energético y las emisiones de CO₂-equivalente en un 18%. Asimismo, Cacace et al. (2020) compararon el procesamiento de jugo de naranja mediante tecnologías térmicas, como la pasteurización indirecta antes del envasado y la pasteurización por retorta y tecnologías no térmicas como el HPP; los resultados mostraron que las emisiones de CO₂ asociadas a los métodos térmicos fueron: 0.303 kg CO₂-eq/L y 0.532 kg CO₂-eq/L, respectivamente. En cambio, el HPP generó 0.252 kg CO₂-eq/L, evidenciando un menor impacto ambiental. Si bien en los últimos años se han incrementado los estudios para establecer las ventajas de las tecnologías no térmicas sobre las tecnologías convencionales que involucran altas temperaturas, las investigaciones enfocadas en estimar la cantidad de contaminantes emitidos por los distintos procesos de la industria alimentaria aún son limitadas.

Otra estrategia complementaria para reducir el impacto ambiental de la industria alimentaria implica minimizar el desperdicio de alimentos mediante el aumento de la vida útil de los productos. Se estima que el tratamiento de residuos alimentarios genera aproximadamente 0.208 kg CO₂-eq/kg de residuo tratado (Punthi et al., 2022). Las tecnologías anteriormente mencionadas logran minimizar pérdidas en etapas postcosecha e incrementar la vida de anaquel, lo cual incide en el impacto ambiental de la industria alimentaria. Manzoor et al. (2021), estudiaron la reducción de microorganismos en leche de almendra sometida a tratamiento de ultrasonido (40 kHz, 600 W y 60 °C) durante 40 minutos, la investigación descubrió una reducción de 5 y 4 unidades logarítmicas en bacterias aerobias y en levaduras y mohos, respectivamente. De manera similar, Atalar et al. (2019) encontraron una disminución de 5 unidades logarítmicas de bacterias aerobias en leche de avellana sometida a sonicación (62.37 W/cm² y 75 °C) por 15 minutos. La aplicación de estas tecnologías ha demostrado ser eficaces en diversos productos alimentarios como frutos, lácteos, cárnicos, etc. (Alarcon-Rojo et al., 2019; Calderón-Martínez et al., 2021; Manzoor, Xu et al., 2021; Wang et al., 2020).

Aunado a lo anterior, las tecnologías no térmicas han demostrado ser efectivas al no degradar pigmentos, aromas, vitaminas y antioxidantes presentes en productos como jugos, bebidas (lácteas y vegetales) y productos lácteos, en comparación con tratamientos térmicos convencionales (Alirezalu et al., 2020; Baranda y Montes, 2020; Cheng et al., 2020; Pandiselvam et al., 2023; Pérez-Lamela et al., 2021; Shen et al., 2021).

Al considerar tanto sus ventajas tecnológicas como ambientales, estas tecnologías emergentes se perfilan como herramientas clave en la transición hacia sistemas alimentarios más sostenibles, eficientes y responsables con el medio ambiente. Su implementación permite reducir significativamente el consumo energético y las emisiones de CO₂, sin comprometer la calidad nutricional, sensorial o microbiológica de los alimentos. Sin embargo, pesar de sus ventajas, la adopción de estas tecnologías enfrenta desafíos como la inversión inicial en equipos, la necesidad de adaptar líneas de procesamiento y la falta de marcos normativos estandarizados para su uso a gran escala.

Perspectivas de las tecnologías no térmicas y su impacto en la sostenibilidad alimentaria en México

Desde el año 2014, en México se ha reconocido la necesidad de fortalecer la seguridad alimentaria a través del empoderamiento de los consumidores mediante estrategias de educación en salud y nutrición (FAO, 2024). En este marco, la innovación alimentaria ha incorporado no sólo el análisis del contenido calórico de los productos, sino también el desarrollo de herramientas como el etiquetado frontal, el cual permite una mejor información sobre la naturaleza de los alimentos y sus impactos en la salud pública (D'Amico et al., 2016).

Además del etiquetado nutricional, ha surgido el concepto de etiquetado verde, que informa al consumidor sobre el impacto ambiental de los productos y promueve decisiones de compra más sostenibles. Esta herramienta responde a una creciente demanda social por una mayor transparencia sobre los métodos de producción, apoyando así comportamientos de consumo responsables (D'Amico et al., 2016; Potter et al., 2021).

En este contexto, las tecnologías de procesamiento no térmico representan una alternativa viable y estratégica para producir alimentos sostenibles. Estas tecnologías permiten conservar los productos mediante la inactivación de microorganismos y enzimas, sin el uso de altas temperaturas, lo que reduce el deterioro nutricional y sensorial, así como el impacto ambiental del procesamiento (Melios et al., 2025). Su aplicación también abre la posibilidad de formular productos en los que ciertos ingredientes puedan ser sustituidos por alternativas más sostenibles, sin comprometer la inocuidad ni la calidad.

La adopción de tecnologías verdes ha ido en aumento. De acuerdo con Sanz-Cañada (2022), el consumo nacional de alimentos sostenibles en México creció un 132% en los últimos años. Este fenómeno refleja una creciente conciencia social sobre la relación entre salud, alimentación y medio ambiente. En consecuencia, se ha intensificado la búsqueda de métodos de producción que no comprometan la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades.

México es uno de los principales exportadores de productos agroalimentarios, destacando bienes de alto valor comercial como el aguacate, mango, papaya, cerveza, chile y tequila, entre otros, con fuerte presencia en estados como Guerrero y Oaxaca (FAO, 2024). En este contexto, la incorporación de prácticas sostenibles a lo largo de la cadena de producción representa una oportunidad para transitar hacia una industria alimentaria más verde. La promoción de estrategias que reduzcan el uso de recursos y protejan los ecosistemas resulta indispensable para lograr este objetivo (Astudillo-Suárez, 2025).

Por otro lado, en la legislación mexicana, particularmente, la NOM-051-SCFI/SSA1-2010, establece criterios para el etiquetado de alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasadas, permitiendo a los consumidores tomar decisiones informadas con base en aspectos nutricionales. Si bien esta norma ha sido fundamental, su complementariedad con políticas que impulsen la sostenibilidad, como el etiquetado ambiental o “verde”, es una oportunidad para fortalecer el compromiso con la salud y el medio ambiente.

La dinámica actual del mercado abre espacios para aplicar innovaciones biotecnológicas orientadas a la sostenibilidad. Estas innovaciones no sólo buscan mejorar la calidad de los alimentos, sino también aumentar la com-

petitividad de las empresas del sector agroalimentario (Gallego-Bono y Tapia-Miranda, 2021).

Conclusión

La industria alimentaria se encuentra en un punto de inflexión: continuar y perpetuar los sistemas de procesamiento basados en tecnologías térmicas que, si bien han demostrado ser eficientes, presentan desventajas como la degradación de compuestos de interés en los alimentos y un alto impacto ambiental, debido a su elevada demanda energética, o bien, invertir y avanzar hacia tecnologías más sostenibles, eficaces y amigables con el medio ambiente.

En conclusión, las tecnologías no térmicas no sólo representan una herramienta clave para mejorar la sostenibilidad ambiental del procesamiento de alimentos, sino también una vía para innovar en la oferta de productos seguros, nutritivos y alineados con las exigencias del consumidor y del planeta.

Referencias

- Acosta-Calderón, J., Sáyago Ayerdi S. (2024). Alimentación sostenible para la nutrición, salud, bienestar. *Conciencia Tecnológica*, 67, 6-12.
- Alarcon-Rojo, A. D., Carrillo-López, L. M., Reyes-Villagrana, R., Huerta-Jiménez, M. y García-Galicia, I. A. (2019). Ultrasound and meat quality: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 55, 369-382. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.016>
- Alirezalu, K., Munekata, P. E. S., Parniakov, O., Barba, F. J., Witt, J., Toepfl, S., ... Lorenzo, J. M. (2020). Pulsed electric field and mild heating for milk processing: A review on recent advances. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(1), 16-24. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9942>
- Allegretti, G., Montoya, M. A., Bertussi, L. A. S. y Talamini, E. (2022). When being renewable may not be enough: Typologies of trends in energy and carbon footprint towards sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112860. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112860>
- Amjad, N., Imran, A., Naseer, M. S., Tariq, F., Afzaal, M., Fatima, K., Kalandarov, A. e Islam, F. (2025). High pressure processing as a green technology approach for the synthe-

- sis of clean labels in dairy sector: A comprehensive review. *Tikrit Journal for Agricultural Sciences*, 25(1), 132-152. <https://doi.org/10.25130/tjas.25.1.11>
- Arnal, Á. J., Royo, P., Pataro, G., Ferrari, G., Ferreira, V. J., López-Sabirón, A. M. y Ferreira, G. A. (2018). Implementation of PEF treatment at real-scale tomatoes processing considering LCA methodology as an innovation strategy in the agri-food sector. *Sustainability*, 10(4), 979. <https://doi.org/10.3390/su10040979>
- Astudillo-Suárez R. (2025). *Iniciativa con proyecto de decreto por el que se expide la ley nacional contra el desperdicio de alimentos*. Diario Oficial de la Federación.
- Atalar, I., Gul, O., Saricaoglu, F. T., Besir, A., Gul, L. B. y Yazici, F. (2019). Influence of thermosonication (TS) process on the quality parameters of high pressure homogenized hazelnut milk from hazelnut oil by-products. *Journal of Food Science and Technology*, 56(3), 1405-1415. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03619-7>
- Baranda, A. B. y Montes, P. (2020). HPP for improving preservation of vitamin and antioxidant contents in vegetable matrices. En *Present and future of high pressure processing* (pp. 15-70). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816405-1.00002-9>
- Batty, D., Meunier-Goddik, L. y Waite-Cusic, J. G. (2019). Camembert-type cheese quality and safety implications in relation to the timing of high-pressure processing during aging. *Journal of Dairy Science*, 102(10), 8721-8733.
- Bermejo, L., Trabado-Fernández, A., Aparicio, A., Lozano-Estevan, M. y López-Plaza, B. (2023). Sostenibilidad alimentaria: Claves para el consumidor, ventajas e inconvenientes. *Nutrición Hospitalaria*, 40(2), 70-76. <https://doi.org/10.20960/nh.04960>
- Betoret, E., Betoret, N., Rocculi, P. y Dalla Rosa, M. (2015). Strategies to improve food functionality: Structure-property relationships on high pressures homogenization, vacuum impregnation and drying technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 46(1), 1-12.
- Bhatia, L., Kaladhar, D. S. V. G. K., Sarkar, T., Jha, H. y Kumar, B. (2024). Food wastes phenolic compounds (PCs): Overview of contemporary greener extraction technologies, industrial potential, and its integration into circular bioeconomy. *Energy, Ecology and Environment*, 9(5), 455-485. <https://doi.org/10.1007/s40974-024-00321-z>
- Caballero-Figueroa, E., Terrés, E., Hernández-Hernández, H. M. y 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>
- Cacace, F., Bottani, E., Rizzi, A. y Vignali, G. (2020, marzo). Evaluation of the economic and environmental sustainability of high pressure processing of foods. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 60, 102281. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102281>
- Calderón-Martínez, V., Delgado-Ospina, J., Ramírez-Navas, J. S., Flórez-López, E., Valdés-Restrepo, M. P., Grande-Tovar, C. D. y Chaves-López, C. (2021). Effect of pre-treatment with low-frequency ultrasound on quality parameters in gulupa (*Passiflora edulis* Sims) pulp. *Applied Sciences*, 11(4), 1-15. <https://doi.org/10.3390/app11041734>
- Chemat, F., Rombaut, N., Meullemiestre, A., Turk, M., Perino, S., Fabiano-Tixier, A.-S. y

- Abert-Vian, M. (2017). Review of green food processing techniques: Preservation, transformation, and extraction. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 357-377. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.016>
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S. y Abert-Vian, M. (2017, enero). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540-560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
- Cheng, C., Jia, M., Gui, Y. y Ma, Y. (2020). Comparison of the effects of novel processing technologies and conventional thermal pasteurisation on the nutritional quality and aroma of Mandarin (Citrus unshiu) juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 102425. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102425>
- D'Amico, P., Armani, A., Gianfaldoni, D. y Guidi A. (2016). New provisions for the labelling of fishery and aquaculture products: Difficulties in the implementation of regulation (EU) n. 1379/2013. *Marine Policy*, 71, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.05.026>
- Fanzo, J., Haddad, L., Schneider, K. R., Béné, C., Covic, N. M., Guarin, A., Herforth, A. W., Herrero, M., Sumaila, U. R., Aburto, N. J., Amuyunzu-Nyamongo, M., Barquera, S., Battersby, J., Beal, T., Bizzotto Molina, P., Brusset, E., Cafiero, C., Campeau, C., Caron, P., ... y Rosero Moncayo, J. (2021). Viewpoint: Rigorous monitoring is necessary to guide food system transformation in the countdown to the 2030 global goals. *Food Policy*, 104, 102163. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102163>
- Faraday, M. (1850). Experimental researches in electricity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 140, 171-188. <https://doi.org/10.1098/rstl.1850.0008>
- Gabrić, D., Barba, F., Roohinejad, S., Gharibzadeh, S. M. T., Radojčin, M., Putnik, P. y Bursać Kovačević, D. (2018). 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). <https://doi.org/10.1111/jfpe.12638>
- Gallego-Bono, J. y Tapia-Baranda, M. (2021). Industrial ecology and sustainable change: Inertia and transformation in Mexican agro-industrial sugarcane clusters. *European Planning Studies*, 30(7), 1271-1291. <https://doi.org/10.1080/09654313.2020.1869186>
- Hassoun, A., Prieto, M. A., Carpena, M., Bouzembrak, Y., Marvin, H. J. P., Pallarés, N., Barba, F. J., Punia Bangar, S., Chaudhary, V., Ibrahim, S. y Bono, G. (2022). Exploring the role of green and Industry 4.0 technologies in achieving sustainable development goals in food sectors. *Food Research International*, 162, 112068. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112068>
- He, X., Jia, G., Tatsumi, E. y Liu, H. (2016). Effect of corona wind, current, electric field and energy consumption on the reduction of the thawing time during the high-voltage electrostatic-field (HVEF) treatment process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 135-140. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.006>
- Hu, F., Qian, S., Huang, F., Han, D., Li, X. y Zhang, C. (2021, octubre). Combined impacts

- of low voltage electrostatic field and high humidity assisted-thawing on quality of pork steaks. *LWT*, 150, 111987. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111987>
- Huang, H., Gao, T., Qian, X., Wu, W., Fan, X., Shi, L., Xiong, G., Ding, A., Li, X., Qiao, Y., Liao, L. y Wang, L. (2022). In vitro antibacterial mechanism of high-voltage electrostatic field against *Acinetobacter johnsonii*. *Foods*, 11(7), 955. <https://doi.org/10.3390/foods11070955>
- Inácio, R. S., Fidalgo, L. G., Santos, M. D., Queirós, R. P. y Saraiva, J. A. (2014). Effect of high-pressure treatments on microbial loads and physicochemical characteristics during refrigerated storage of raw milk Serra da Estrela cheese samples. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(5), 1272-1278.
- Karwacka, M., Ciurzyńska, A., Galus, S. y Janowicz, M. (2022). Freeze-dried snacks obtained from frozen vegetable by-products and apple pomace: Selected properties, energy consumption and carbon footprint. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102949. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102949>
- Komora, N., Maciel, C., Pinto, C. A., Ferreira, V., Brandão, T. R., Saraiva, J. M. y Teixeira, P. (2020). Non-thermal approach to *Listeria monocytogenes* inactivation in milk: The combined effect of high pressure, pediocin PA-1 and bacteriophage P100. *Food Microbiology*, 86, 103315.
- Kumar, K., Srivastav, S. y Sharanagat, V. S. (2021). Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105325. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105325>
- Li, M., Zhou, C., Wang, B., Zeng, S., Mu, R., Li, G., Li, B. y Lv, W. (2023). Research progress and application of ultrasonic-and microwave-assisted food processing technology. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(5), 3707-3731. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13198>
- Li, T., An, G., Sun, Q., Xu, T., Du, D., Zhang, Y., Chen, H. y Xia, G. (2023). Effects of high voltage electrostatic field and weak magnetic field assisted refrigeration on preservation of spinach. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(6), 6484-6502. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-02119-9>
- Liu, J., Zhu, F., Yang, J., Wang, Y., Ma, X., Lou, Y. y Li, Y. (2023). Effects of high-voltage electrostatic field (HVEF) on frozen shrimp (*Solenocera melanthera*) based on UPLC-MS untargeted metabolism. *Food Chemistry*, 411, 135499. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135499>
- Lotfi, M., Hamdami, N., Dalvi-Isfahan, M. y Fallah-Joshaqani, S. (2022). Effects of high voltage electric field on storage life and antioxidant capacity of whole pomegranate fruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 75, 102888. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102888>
- López-Pedrouso, M., Díaz-Reinoso, B., Lorenzo, J. M., Cravotto, G., Barba, F. J., Moure, A., Domínguez, H. y Franco, D. (2019). Green technologies for food processing: Principal considerations. En *Innovative thermal and non-thermal processing, bioaccessibility and bioavailability of nutrients and bioactive compounds* (pp. 55-103). Woodhead. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814174-8.00003-2>

- Lu, Y., Jiang, Y., Wang, H., Yu, J., Hou, H., Rong, C., Liu, N. y Hao, Y. (2024). Effect of space electric field on the shelf-life extension of plum fruit (GuoFeng17). *Journal of Food Engineering*, 366, 111866. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111866>
- Manzoor, M. F., Siddique, R., Hussain, A., Ahmad, N., Rehman, A., Siddeeg, A., ... Yahya, M. A. (2021). Thermosonication effect on bioactive compounds, enzymes activity, particle size, microbial load, and sensory properties of almond (*Prunus dulcis*) milk. *Ultrasonics Sonochemistry*, 78, 105705. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105705>
- Manzoor, M. F., Xu, B., Khan, S., Shukat, R., Ahmad, N., Imran, M., ... Korma, S. A. (2021). Impact of high-intensity thermosonication treatment on spinach juice: Bioactive compounds, rheological, microbial, and enzymatic activities. *Ultrasonics Sonochemistry*, 78, 105740. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105740>
- Martínez-Acosta, M., Vázquez-Villegas, P., Mejía-Manzano, L. A., Soto-Inzunza, G. V., Ruiz-Aguilar, K. M., Kuhn Cuellar, L., Caratozzolo, P. y Membrillo-Hernández, J. (2023). The implementation of SDG12 in and from higher education institutions: Universities as laboratories for generating sustainable cities. *Frontiers in Sustainable Cities*, 5. <https://doi.org/10.3389/frsc.2023.1158464>
- Mgoma, S. T., Basitere, M., Mshayisa, V. V. y De Jager, D. (2025). A systematic review on sustainable extraction, preservation, and enhancement in food processing: The advancement from conventional to green technology through ultrasound. *Processes*, 13(4), 965. <https://doi.org/10.3390/pr13040965>
- Munir, M., Nadeem, M., Qureshi, T. M., Gamlath, C. J., Martin, G. J., Hemar, Y. y Ashokkumar, M. (2020). Effect of sonication, microwaves and high-pressure processing on ACE-inhibitory activity and antioxidant potential of Cheddar cheese during ripening. *Ultrasonics Sonochemistry*, 67, 105140.
- Norma Oficial Mexicana. (s/f). NOM-051-SCFI/SSA1-2010: Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados: Información comercial y sanitaria.
- Organización de las Naciones Unidas, Asamblea General. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*.
- Pandiselvam, R., Mitharwal, S., Rani, P., Shanker, M. A., Kumar, A., Aslam, R., ... Mousavi Khaneghah, A. (2023). The influence of non-thermal technologies on color pigments of food materials: An updated review. *Current Research in Food Science*, 6, 100529. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100529>
- Patel, H. A., Carroll, T. y Kelly, A. L. (2015). Potential applications of nonthermal processing technologies in the dairy industry. En R. C. Chandan, A. Kilara y N. P. Shah (Eds.), *Dairy processing and quality assurance* (pp. 528-551). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118810279.ch22>
- Pattnaik, M., Pandey, P., Martin, G. J. O., Mishra, H. N. y 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), art. 2. <https://doi.org/10.3390/foods10020279>
- Perera, C. O. y Alzahrani, M. A. J. (2021). Ultrasound as a pre-treatment for extraction of

- bioactive compounds and food safety: A review. *LWT*, 142, 111114. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111114>
- Pérez-Lamela, C., Franco, I. y Falqué, E. (2021). Impact of high-pressure processing on antioxidant activity during storage of fruits and fruit products: A review. *Molecules*, 26(17), 5265. <https://doi.org/10.3390/molecules26175265>
- Potter, C., Bastounis, A., Jebb, S. (2021). The effects of environmental sustainability labels on selection, purchase, and consumption of food and drink products: A systematic review. *Environmental and Behavior*, 53(8), 891-925. <https://doi.org/10.1177/0013916521995473>
- Punthi, F. yudhistira, B., Gavahian, M., Chang, C. K., Cheng, K. C., Hou, C. Y. y Hsieh, C. W. (2022). Pulsed electric field-assisted drying: A review of its underlying mechanisms, applications, and role in fresh produce plant-based food preservation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(6), 5109-5130. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13052>
- Qayum, A., Rashid, A., Liang, Q., Wu, Y., Cheng, Y., Kang, L., Liu, Y., Zhou, C., Hussain, M., Ren, X., Ashokkumar, M. y Ma, H. (2023). Ultrasonic and homogenization: An overview of the preparation of an edible protein-polysaccharide complex emulsion. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(6), 4242-4281. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13221>
- Qi, M., Liu, Q., Liu, Y. yan, H., Zhang, Y. y Yuan, Y. (2022). Staphylococcus aureus biofilm inhibition by high voltage prick electrostatic field (HVPEF) and the mechanism investigation. *International Journal of Food Microbiology*, 362, 109499. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109499>
- Qian, J., Chen, D., Zhang, Y., Gao, X., Xu, L., Guan, G. y Wang, F. (2023). Ultrasound-assisted enzymatic protein hydrolysis in food processing: Mechanism and parameters. *Foods*, 12(21), art. 21. <https://doi.org/10.3390/foods12214027>
- Rabbi, M. F. y Amin, M. Bin. (2024). Circular economy and sustainable practices in the food industry: A comprehensive bibliometric analysis. *Cleaner and Responsible Consumption*, 14, 100206. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100206>
- Reitz, J. R., Milford, F. J. y Christy, R. W. (1993). *Foundations of electromagnetic theory* (4ª ed.). Addison-Wesley.
- Roman, S., Sánchez-Siles, L. M. y Siegrist, M. (2017). The importance of food naturalness for consumers: Results of a systematic review. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 44-57.
- Safwa, S. M., Ahmed, T., Talukder, S., Sarker, A. y Rana, M. R. (2024). Applications of non-thermal technologies in food processing Industries-A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 100917. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100917>
- Sanz-Cañada, J. (2022). Innovación y alimentación sostenible, políticas y modelos cooperativos de logística y comercialización. *Mediterráneo Económico*, 35, 333-346.
- Shabir, I., Dash, K. K., Dar, A. H., Pandey, V. K., Fayaz, U., Srivastava, S. y R, N. (2023). Carbon footprints evaluation for sustainable food processing system development: A comprehensive review. *Future Foods*, 7, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100215>

- Shen, Y., Zhu, D., Xi, P., Cai, T., Cao, X., Liu, H. y Li, J. (2021). Effects of temperature-controlled ultrasound treatment on sensory properties, physical characteristics and antioxidant activity of cloudy apple juice. *LWT*, 142, 111030. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111030>
- Soquetta, M. B., Terra, Lisiane de Marsillac, y and Bastos, C. P. (2018). Green technologies for the extraction of bioactive compounds in fruits and vegetables. *CyTA: Journal of Food*, 16(1), 400-412. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1411978>
- The state of food security and nutrition in the world 2024*. (2024). FAO / IFAD / UNICEF / WFP / WHO. <https://doi.org/10.4060/cd1254en>
- Tubiello, F. N., Flammini, A., Karl, K., Obli-Laryea, G., Qiu, S. Y., Heiðarsdóttir, H., ... y Conchedda, G. (2021). *Methods for estimating greenhouse gas emissions from food systems, Part III: Energy use in fertilizer manufacturing, food processing, packaging, retail and household consumption*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7473en>
- Valdez-Miranda, J. I., Guitiérrez-López, G. F., Robles-de la Torre, R. R., Hernández-Sánchez, H. y Robles-López, M. R. (2024). Health benefits of high voltage electrostatic field processing of fruits and vegetables. *Plant Foods for Human Nutrition*, 79(2), 260-269. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01190-x>
- Valdez-Miranda, J. I., Robles-López, M. R., Robles-de-la-Torre, R. R., Alamilla-Beltrán, L., Hernández-Sánchez, H. y Gutiérrez-López, G. F. (2024). Effect of high-voltage electrostatic field treatments on bananas (*Musa paradisiaca* var. *sapientum*) on their postharvest quality, enzymatic activity and morphological changes. *Food and Bioproducts Processing*, 146, 135-146. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.05.007>
- Wang, G., Huang, J., Gao, W., Lu, J., Li, J., Liao, R. y Jaleel, C. A. (2009). The effect of high-voltage electrostatic field (HVEF) on aged rice (*Oryza sativa* L.) seeds vigor and lipid peroxidation of seedlings. *Journal of Electrostatics*, 67(5), 759-764. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2009.05.004>
- Wang, J., Liu, Q., Xie, B. y Sun, Z. (2020). Effect of ultrasound combined with ultraviolet treatment on microbial inactivation and quality properties of mango juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64, 105000. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105000>
- Xie, D., Rong, H., Xu, Y. yu, Y., Zou, B., Dai, F., Li, L., Peng, J. y Cheng, L. (2025). Impact of high-voltage electric field coupled with heat transfer medium on the thawing quality of lychee. *LWT*, 223, 117805. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117805>
- Xu, C., Zhang, X., Liang, J., Fu, Y., Wang, J., Jiang, M. y Pan, L. (2022). Cell wall and reactive oxygen metabolism responses of strawberry fruit during storage to low voltage electrostatic field treatment. *Postharvest Biology and Technology*, 192, 112017. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112017>
- Xu, Y., Leng, D., Li, X., Wang, D., Chai, X., Schroyen, M., Zhang, D. y Hou, C. (2024). Effects of different electrostatic field intensities assisted controlled freezing point storage on water holding capacity of fresh meat during the early postmortem period. *Food Chemistry*, 439, 138096. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138096>
- Yan, M. yuan, B., Xie, Y., Cheng, S., Huang, H., Zhang, W., Chen, J. y Cao, C. (2020). Improvement of postharvest quality, enzymes activity and polyphenoloxidase structure of postharvest *Agaricus bisporus* in response to high voltage electric field. *Posthar-*

- vest Biology and Technology*, 166, 111230. <https://doi.org/10.1016/j.postharv-bio.2020.111230>
- Younis, K., Jahan, K., Qadri, O. S., Osama, K. y Yousuf, O. (2025). Non-thermal processing techniques for sustainable food supply chains. *Sustainable Futures*, 9, 100658. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100658>
- Zhao, Y., Li, L., Gao, S., Wang, S., Li, X. y Xiong, X. (2023). Postharvest storage properties and quality kinetic models of cherry tomatoes treated by high-voltage electrostatic fields. *LWT*, 176, 114497. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114497>