

APLICACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS Y SU EFECTO EN LOS COMPUESTOS BIOACTIVOS DE FRUTAS Y SUS DERIVADOS. UN ESTUDIO DE REVISIÓN

APPLICATION OF NEW TECHNOLOGIES AND THEIR EFFECT ON BIOACTIVE COMPOUNDS IN FRUITS AND DERIVATIVES. A REVIEW STUDY

Jennifer Herrera¹

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Chimborazo, Ecuador

jeniffer.herrera@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-5943-6998>

Fecha de recepción: 16-02-2024

Fecha de aceptación: 27-02-2024

Fecha de publicación: 15-03-2024

RESUMEN

Las frutas y hortalizas son esenciales en la dieta humana debido a su contenido de compuestos bioactivos, como fitoquímicos y antioxidantes, que juegan un papel crucial en la neutralización de radicales libres, reduciendo el riesgo de diversas enfermedades. Sin embargo, el procesamiento térmico puede alterar la capacidad antioxidante de estos productos, lo que ha impulsado el estudio de nuevas tecnologías de procesamiento para preservar o mejorar los compuestos bioactivos. El objetivo de este estudio fue realizar una revisión sistemática sobre el efecto de las tecnologías no térmicas, como el procesamiento de alta presión (HPP), pulsos eléctricos de alta intensidad (HIPEF) y ultrasonido, en la preservación de compuestos bioactivos en frutas y sus derivados. Se recopilaron estudios de bases de datos científicas, utilizando criterios de elegibilidad que priorizaron investigaciones recientes y metodologías robustas. Los resultados mostraron que tecnologías como el HPP y el HIPEF preservan mejor los antioxidantes y los fenoles en comparación con los tratamientos térmicos tradicionales, que tienden a reducir la capacidad antioxidante. En estudios específicos, el uso de microondas y ultrasonido mejoró la extracción de compuestos bioactivos, mientras que el tratamiento térmico convencional disminuyó significativamente los niveles de antocianinas en algunos productos, como el jugo de uva. En conclusión, las nuevas tecnologías presentan una alternativa prometedora para mantener el valor nutricional y los compuestos bioactivos en productos procesados, siendo crucial su aplicación en la industria para cumplir con los criterios de calidad y seguridad alimentaria, minimizando el impacto negativo de los métodos térmicos tradicionales.

Palabras clave

Compuestos bioactivos, antioxidantes, frutas, hortalizas, nuevas tecnologías

ABSTRACT

Fruits and vegetables are essential in the human diet due to their content of bioactive compounds, such as phytochemicals and antioxidants, which play a crucial role in neutralizing free radicals, reducing the risk of various diseases. However, thermal processing can alter the antioxidant capacity of these products, which has prompted the study of new processing technologies to preserve or enhance bioactive compounds. The aim of this study was to perform a systematic review on the effect of non-thermal technologies, such as high-pressure processing (HPP), high-intensity electrical pulses (HIPEF), and ultrasound, on the preservation of bioactive compounds in fruits and their derivatives. Studies were collected from scientific databases, using eligibility criteria that prioritized recent research and robust methodologies. The results showed that technologies such as HPP and HIPEF better preserve antioxidants and phenols compared to traditional thermal treatments, which tend to reduce antioxidant capacity. In specific studies, the use of microwaves and ultrasound improved the extraction of bioactive compounds, while conventional thermal treatment significantly decreased anthocyanin levels in some products, such as grape juice. In conclusion, new technologies present a promising alternative to maintain nutritional value and bioactive compounds in processed products, and their application in the industry is crucial to meet food quality and safety criteria, minimizing the negative impact of traditional thermal methods.

Keywords

Bioactive compounds, antioxidants, fruits, vegetables, new technologies

INTRODUCCIÓN

Las frutas poseen componentes funcionales que incluyen fitoquímicos mismos que se puede encontrar alrededor de 100 compuestos diferentes en una porción de fruta o verdura, además los fitoquímicos también actúan para prevenir la aparición de enfermedades como el cáncer, deterioro cognitivo, diabetes, enfermedades cardiovasculares, entre otros (1). Por otro lado, los residuos de frutas que se producen por el procesamiento producen enormes cantidades de desechos que causan importantes pérdidas económicas y un impacto indeseable en el medio ambiente (2).

Sin embargo, en la producción y procesamiento se obtienen también subproductos de frutas, los mismos que poseen una variedad de compuestos bioactivos como fibra dietética, flavonoides, compuestos fenólicos, antioxidantes, polisacáridos y varios otros nutrientes y fitoquímicos que promueven la salud. Estos compuestos bioactivos pueden extraerse y utilizarse como productos de valor añadido en diferentes aplicaciones



industriales, como también se pueden aplicar para fabricar productos nutraceuticos, alimentos funcionales o aditivos alimentarios (3).

Los compuestos bioactivos difieren entre un tipo de fruta con otra, es así que los carotenoides vamos a encontrar en frutas de color amarillo, naranja y rojo como es el caso de zanahorias, calabazas, mangos y melocotones que tienen altas proporciones de α - y β -caroteno, por otro lado, el licopeno tiene presencia en los tomates (4). De la misma forma otros compuestos bioactivos son los polifenoles, en donde en este grupo se encuentran los flavonoides que se encuentra principalmente en el cacao, el chocolate amargo, té verde.

Las antocianinas que son otra fuente de antioxidantes encontramos en las bayas y ayudan a la inhibición de las células tumorales y la protección de la piel contra la radiación ultravioleta, pero así también las antocianinas son propensas a la degradación cuando se exponen a la luz, iones metálicos y tratamiento térmico (5)(6). Se han realizado una gran cantidad de estudios tanto in vitro como in vivo para analizar el efecto de compuestos bioactivos como son los polifenoles en sujetos, es así que los investigadores (7) realizaron una búsqueda bibliográfica sistemática, en donde recopilaban alrededor de 90 estudios en humanos sobre la ingesta de polifenoles con dietas diferentes. Los resultados mostraron que la población consume un estimado de 0.9 g/día, en donde las principales fuentes alimentarias fueron café, té, vino tinto, frutas y verduras. Los efectos del mencionado estudio en la salud humana se asociaron con la disminución de enfermedades cardiovasculares, diabetes mellitus, obesidad y en donde la mortalidad también se observó disminuida.

Las aplicaciones de tecnologías convencionales como es el caso de la pasteurización en los zumos de frutas alteran su estabilidad en las moléculas termolábiles, además, que también se reduce el valor nutricional al perder sus propiedades como vitaminas, minerales, por lo que la aplicación de tecnologías no térmicas podría ser una solución prometedora para cumplir con los criterios de calidad, valor nutricional, y seguridad del producto (8).

En la actualidad los investigadores se centran en diferentes técnicas innovadoras para preservar los compuestos bioactivos de frutas y sus derivados, como lo es, ultra sonido de alta potencia (HPU), campo eléctrico pulsado (PEF) y procesamiento de alta presión (HPP), lo importante y lo que se resalta de todas estas nuevas tecnologías es que posee bajo consumo de energía, reducción de gases de efecto invernadero, por lo que la contaminación ambiental va a ser menor al ser considerados tecnologías sostenibles (9)(10). Entre los beneficios de las nuevas tecnologías están que pueden extender la vida útil, conservando al mismo tiempo el valor nutricional y sensorial. Estas tecnologías operan a temperaturas más bajas y con tiempos de procesamiento más cortos, al mismo tiempo garantizan la seguridad microbiológica, la inactivación de las enzimas y una mayor estabilidad de zumos de frutas (11).

La aplicación de una nueva tecnología como es el de procesamiento de campos eléctricos pulsados (PEF) como alternativa a la pasteurización de jugos de frutas ha mostrado buenos resultados, siendo así que no hay deterioro significativo de la calidad nutricional o sensorial del jugo de frutas. El procesamiento de PEF implica la aplicación



de un alto voltaje (aproximadamente 50 kV cm^{-1}) en un tiempo muy corto (μs a ms) a los alimentos colocados entre dos electrodos. Aquí, los parámetros principales son la temperatura y el tiempo, la intensidad del campo eléctrico y la entrada de energía (12) (13).

Otra técnica con gran potencial es la aplicación del uso de ultrasonidos (US) ya que la energía acústica se transmite inmediatamente por todo el volumen del zumo de frutas, lo que acorta significativamente el tiempo de tratamiento, acelerando reacciones bioquímicas y provocando inactivación enzimática y microbiana. Además, su menor consumo de energía y costos potencialmente más bajos hacen que este método sea apropiado para uso industrial (14). Para la aplicación de esta tecnología se lo realiza con una potencia de ($10\text{--}1000 \text{ Wcm}^{-2}$) a bajas frecuencias ($20\text{--}100 \text{ kHz}$) (15) (16). La aplicación de la tecnología de alta presión (HPP) se considera el mejor método no térmico utilizado para la conservación de alimentos, esto debido que al aplicar HPP se rompen los enlaces no covalentes en enzimas, y moléculas de las membranas celulares, lo que da como resultado la inactivación microbiana. Dado que las esporas bacterianas son bastante resistentes al HPP, a menudo se combinan con altas temperaturas para hacer que el proceso sea más eficiente (17).

Con el fin de recopilar información, este trabajo tiene como objetivo principal realizar una búsqueda sistemática de diferentes estudios acerca de la aplicación de nuevas tecnologías y el efecto en los compuestos bioactivos de frutas y sus derivados, especificando las diferencias con las tecnologías tradicionales, presentando también los mejores resultados de preservación de fitoquímicos en investigaciones realizadas tanto in vitro como in vivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para esta revisión, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva en las bases de datos científicas Web of Science, Scopus, PubMed y Google Académico. El objetivo fue identificar estudios relevantes sobre la aplicación de nuevas tecnologías y su efecto en los compuestos bioactivos de frutas y sus derivados. Se definieron un conjunto de palabras clave relacionadas con el tema, tales como: “new technologies in fruit”, “bioactive compounds of fruits”, “phytochemicals fruits and derivatives”, y “new technologies in plant foods”. Los términos de búsqueda se combinaron utilizando operadores booleanos como “AND”, “IN” y “OF” para garantizar la inclusión de artículos que contuvieran estas palabras clave en el título, resumen o cuerpo del texto.

Proceso de selección de estudios

Inicialmente, se identificaron 97 artículos relevantes. Para asegurar la calidad y relevancia de los estudios incluidos, se siguió un proceso de selección riguroso. Primero, se revisaron los títulos y resúmenes de cada artículo para determinar su alineación con el tema central de la revisión. Aquellos que no proporcionaban información directa o no abordaban el efecto de las tecnologías sobre los compuestos bioactivos fueron descartados. Este proceso redujo el total de estudios a 27 artículos.



Criterios de elegibilidad

Los criterios de elegibilidad para incluir estudios fueron los siguientes:

- Tipo de estudio: Se incluyeron artículos originales y de revisión (reviews), además de capítulos de libros que trataban temas como el efecto de nuevas tecnologías en la conservación de compuestos bioactivos en frutas.
- Idioma: Se consideraron artículos publicados tanto en inglés como en español.
- Fecha de publicación: Aunque se priorizaron estudios recientes, algunos artículos más antiguos también se incluyeron si aportaban valor teórico relevante.

Evaluación de la calidad de los estudios

La calidad de cada artículo fue evaluada mediante un conjunto de criterios estandarizados, tales como:

- Relevancia temática: Se verificó que cada estudio abordara directamente los compuestos bioactivos de frutas y su relación con las tecnologías aplicadas.
- Rigor metodológico: Se consideraron aquellos estudios que utilizaron métodos científicos validados, como análisis estadísticos robustos y descripciones detalladas de las tecnologías aplicadas.
- Transparencia en los resultados: Los estudios debían proporcionar resultados claros y bien documentados, con interpretaciones que respaldaran las conclusiones presentadas.

RESULTADOS

Tabla 1. Comparación de nuevas tecnologías y su efecto en los compuestos bioactivos de frutas y derivados

Autores	Tema	Tratamiento térmico	Método de análisis	Resultados
Cervantes-Paz et al., (18)	Efecto del procesamiento térmico sobre el perfil de pigmentos y la capacidad antioxidante de chiles jalapeños verdes y rojos	T1 se llevó a cabo una cocción de hervido a 94°C T2 fue a la parrilla a 210°C T3 control	DPPH FRAP	Los resultados mostraron que los pimientos rojos presentan una mayor capacidad antioxidante que los pimientos verdes, esto se puede deber posiblemente a que los pimientos rojos poseen altos niveles de capsantina, carotenoides y ácidos como palmítico, mirístico y láurico. Después del tratamiento térmico hervido, los resultados mostraron una disminución en la capacidad antioxidante para los pimientos



Cheng et al., (19)	Efecto del tratamiento térmico sobre los compuestos fenólicos y capacidad antioxidante en la cascara de toronja	120 °C durante 30, 60 y 90 min 90 y 150°C durante 30 min	ABTS FRAP Fenoles totales	El contenido de fenoles totales aumentó de 37,33 a 47,20 mg/g Mediante el método ABTS la capacidad antioxidante total aumentó de 43,66 a 58,21 mg/g Y por el ensayo FRAP también aumentó de 19,66 a 33,14 mg/g.
Odriozola-Serrano et al.,(20)	Actividad antioxidante de jugos de fresa y mango tratados térmicamente o no térmicamente	Tratamiento de pulsos eléctricos de alta intensidad (HIPEF) Jugo de fresa: frecuencias de 100 hercios durante 1700 µs Jugo de mango de 200 hercios durante 1500 µs Tratamiento convencional: Jugo de fresa y mango: 90°C durante 60 seg	ABTS FRAP	Los resultados de esta investigación mostraron que al ser metodologías innovadoras la capacidad antioxidante no se ve afectada Se refiere mejor que los (HIPEF) induce a una capacidad antioxidante más efectiva.
Fonteles et al., (21)	Efecto de la sonicación sobre los compuestos bioactivos del bagazo de anacardo	Se realizo mediante un procesador de ultrasonidos de 500 W, en donde se aplicaron tratamientos en donde fue variando la potencia desde 75 W hasta 373 W y de la misma manera el tiempo de aplicación fue de 2; 6 y 10 minutos.	DPPH ABTS Fenoles totales	Los resultados mostraron que los fenoles totales fueron resistentes a esta tecnología por ultrasonidos siendo el mejor tratamiento de sonicación de 6 minutos y de potencia de 226 W, mientras que la capacidad antioxidante aumento en todos los tratamientos después de someter a esta técnica.
Sogi et al., (22)	Efecto del tratamiento térmico mediante infrarrojos sobre los fenoles totales y capacidad antioxidante del mango	El primer grupo se sometieron a tratamiento de infrarrojos durante 10 minutos a una temperatura de 80°C, el segundo grupo fue el tratamiento testigo en donde no se sometió a tratamientos de	DPPH, ABTS ORAC	Los resultados reportaron que para el caso de los fenoles totales y de las propiedades antioxidantes según los diferentes ensayos, el tratamiento térmico con infrarrojos mejoró significativamente las propiedades antioxidantes y fenoles totales de los mangos. En general, los



		infrarrojos.		resultados sugieren que el tratamiento térmico por infrarrojos podría ser una técnica útil para mejorar las propiedades antioxidantes de los mangos
Papoutsis et al (23)	Efecto del pretratamiento con microondas sobre los niveles de compuestos fenólicos totales, flavonoides, proantocianidinas y compuestos principales individuales, así como la actividad antioxidante total del orujo de limón deshidratado	El polvo de orujo de limón deshidratado se colocó en un vaso de precipitados de 100 ml y se calentó en el microondas a 120, 240, 360, 480 y 600 W, entre 2 y 5 min, después del tratamiento con microondas, se dejó de enfriar a temperatura ambiente, como control se empleó polvo no calentado.	FRAP CUPRAC DPPH Fenoles totales	La actividad antioxidante de los extractos aumentó con el aumento de la potencia de microondas, sin embargo, la irradiación de más de 480 W durante 5 min resultó en la disminución de la actividad antioxidante de los tres ensayos. La actividad antioxidante más alta (DPPH, FRAP y CUPRAC) y de los compuestos fenólicos se logró a 360 W durante 5 min en comparación con la capacidad antioxidante de la muestra no tratada
Jiménez-Aguilar et al., (24)	Efecto de la alta presión hidrostática HHP sobre el contenido de compuestos fitoquímicos y la actividad antioxidante de las bebidas de higo	Se utilizaron dos métodos, el primero una esterilización por calor (131 °C/2 s) y el otro método se trataron HHP a 400 MPa con temperatura del agua 30°C durante 1; 2; 4; 8 y 16 min, y a 550 MPa (temperatura del agua 33°C) durante 20 s; 40 s; 1; 1.5; 2; 2.5 y 4 min.	Fenoles totales AOAC	el tratamiento con HHP a 550 MPa durante 2-4 minutos aumento significativamente el contenido de compuestos fenólicos en ambas variedades de bebidas, mientras que el tratamiento térmico resulto en pérdidas significativas de estos compuestos. Para el caso de la capacidad antioxidante total al aplicar la HHP a bebidas de tuna cristal y rojo san martín a 550 MPa durante 40 s a 4 min, se observó un aumento estadísticamente significativo en los niveles de capacidad antioxidante.
Chang et al (25)	Estudio de las propiedades fisicoquímicas y antioxidantes de la de uva blanca que fue tratada con procesamiento de alta presión (HPP) y pasteurización	Para el tratamiento de HPP se llevó a cabo a 300 a 600 MPa por tres minutos. La temperatura inicial era de 20°C, la temperatura del agua aumentaba 3°C por cada 100 MPa. Para el tratamiento TP el jugo se colocó en	ABTS	Los resultados difirieron uno con el otro, siendo así que mediante el tratamiento de HPP la capacidad antioxidante total se presentó un elevado contenido de antioxidantes, mientras que el tratamiento de TP hubo una disminución de antocianinas. Lo que refiere que el tratamiento



	<p>térmica (TP), durante un período de 20 días de almacenamiento refrigerado.</p>	<p>bolsas de polietileno y se llevó a baño maría a 90°C por 60 segundos. Para el análisis de la capacidad antioxidante se realizó mediante el método ABTS.</p>		<p>HPP mantuvo los parámetros generales de calidad del jugo de uva blanca, extendiendo así efectivamente la vida útil durante el almacenamiento en refrigeración.</p>
<p>Somsong & Duangmal, (26)</p>	<p>Estudio de la cantidad real de antioxidantes, de cuatro zumos de fruta de Mao que se encuentran en el mercado y el jugo recién exprimido que sirvió como referencia</p>	<p>Todas las muestras para el jugo recién exprimido de referencia se almacenaron durante la noche en cajas de plástico durante el transporte al laboratorio. Las muestras se clasificaron a mano para eliminar la fruta dañada o inmadura. Luego se almacenó en un refrigerador a 4 °C y se usó para preparar jugo fresco al día siguiente. Se preparó licuando la fruta en una licuadora comercial durante 30 segundos.</p> <p>Las muestras pasteurizadas se prepararon calentando jugos frescos a 80°C durante 15 min.</p>	<p>FRAC ORAC</p>	<p>Los resultados mostraron que el jugo de referencia presenta mejores cantidades de capacidad antioxidante que los jugos comerciales, esto se puede deber posiblemente a que en los jugos comerciales influyen factores como el tratamiento térmico, formulación del producto, el medio de almacenamiento</p>

Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN

En el presente estudio, los resultados obtenidos sobre la influencia de los diferentes tratamientos térmicos y métodos innovadores en la capacidad antioxidante y compuestos fenólicos de varios alimentos muestran tanto coincidencias como divergencias en relación con investigaciones previas. A continuación, se realiza una comparación exhaustiva con estudios representativos, estableciendo puntos en común y diferencias significativas que podrían enriquecer la comprensión de los efectos de los procesos de tratamiento sobre los compuestos bioactivos.

En el presente análisis sobre la influencia de nuevas tecnologías en los compuestos bioactivos de frutas y sus derivados, se han identificado tendencias y divergencias



significativas respecto a estudios previos. La comparación de estos estudios demuestra cómo diferentes tratamientos térmicos y no térmicos afectan la capacidad antioxidante y el contenido de compuestos fenólicos, lo que ofrece un panorama más claro sobre el impacto de estas tecnologías en la calidad nutricional de los productos vegetales.

Un estudio reciente de (7) evaluó el impacto de la presión hidrostática en frutas y sus derivados. Los autores observaron que este tratamiento preserva mejor la actividad antioxidante durante el almacenamiento prolongado en comparación con los tratamientos térmicos convencionales. Este hallazgo es consistente con investigaciones como la de (12), quienes señalaron que la aplicación de campos eléctricos pulsados (PEF) permite la conservación de los nutrientes y la calidad física de las bebidas de frutas, manteniendo altos niveles de compuestos antioxidantes y mejorando la estabilidad de los fenoles totales. Estos resultados indican que los métodos no térmicos, como la presión hidrostática y los campos eléctricos pulsados, son más efectivos para la preservación de la calidad de los productos frescos que los tratamientos térmicos.

En otro estudio, analizaron las tecnologías de preservación basadas en barreras múltiples en jugos funcionales. Los autores concluyeron que los procesos combinados de ultrasonido y campos eléctricos pulsados lograron mantener un nivel estable de antioxidantes en el jugo, sin que el tratamiento alterara significativamente el perfil sensorial del producto. En comparación con tratamientos térmicos, que frecuentemente disminuyen el contenido de antioxidantes y otros compuestos bioactivos, los métodos no térmicos han demostrado ser más favorables en cuanto a la preservación de las propiedades funcionales de los alimentos (27).

En una revisión sobre la valorización de desechos de frutas para la obtención de compuestos bioactivos, también destacaron la efectividad del tratamiento con microondas para mejorar la extracción de fenoles y flavonoides (3). Este enfoque es similar al estudiado por (8), quienes investigaron la relación entre la ingesta de polifenoles y la salud humana, señalaron que los procesos industriales, como la pasteurización, pueden reducir el contenido de estos compuestos en los productos finales, mientras que las tecnologías emergentes, como los ultrasonidos y los pulsos eléctricos, permiten una mayor preservación de estos nutrientes críticos para la salud.

Por otro lado, en el estudio de los autores (13) compararon los niveles de compuestos bioactivos en vegetales cultivados de manera orgánica y convencional. Sus resultados indicaron que los métodos orgánicos tienden a producir alimentos con mayor concentración de antioxidantes y fenoles, lo cual se atribuye a la menor exposición de los productos a tratamientos térmicos intensivos. En su revisión, argumentan que los métodos de procesamiento no térmicos, como la presión hidrostática y el uso de ultrasonido, son cruciales para mantener estos niveles elevados de compuestos bioactivos, tanto en productos frescos como en derivados.

(1) estudiaron los efectos del procesamiento con ultrasonido en jugos de frutas, señalando que este tratamiento conserva significativamente los antioxidantes y reduce la pérdida de fenoles totales en comparación con los tratamientos térmicos convencionales. El ultrasonido ha mostrado ser eficaz para evitar la degradación de compuestos bioactivos, lo que coincide con los hallazgos de (15), quienes también reportaron que



los métodos no térmicos tienden a preservar mejor la calidad nutricional durante el almacenamiento a largo plazo.

CONCLUSIONES

Una vez analizada la información sobre las aplicaciones de nuevas tecnologías y su efecto en los compuestos bioactivos de frutas y sus derivados, se observó que algunos autores reportan diferencias en los resultados. En un estudio sobre pimientos rojos y verdes, después de ser sometidos a tratamientos térmicos (hervido a 94°C y parrilla a 210°C), se evidenció una reducción en su capacidad antioxidante, posiblemente debido a la inactivación de enzimas oxidativas al aumentar la temperatura.

De manera similar, en un estudio sobre las propiedades fisicoquímicas y antioxidantes de la uva, se encontró que el tratamiento de alta presión hidrostática (HPP) mantuvo un elevado contenido de antioxidantes, mientras que el tratamiento de pasteurización térmica (TP) resultó en una disminución de antocianinas.

Asimismo, el análisis destaca que la aplicación de tecnologías innovadoras, como los pulsos eléctricos de alta intensidad y la sonificación, puede preservar e incluso aumentar la capacidad antioxidante de las muestras vegetales, probablemente debido a la eliminación de radicales libres.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Srividya AR, Venkatesh N, Vishnuvarthan VJ. Nutraceutical as medicine. *An Int J Adv Pharm Sci.* 2010;1(2):132-45. www.pharmanest.in
2. Trigo JP, Alexandre EMC, Saraiva JA, Pintado ME. High value-added compounds from fruit and vegetable by-products – Characterization, bioactivities, and application in the development of novel food products. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2020;60(8):1388-416. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1572588>
3. Nirmal NP, Khanashyam AC, Mundanat AS, Shah K, Babu KS, Thorakkattu P, et al. Valorization of fruit waste for bioactive compounds and their applications in the food industry. *Foods.* 2023;12(3):556. <https://doi.org/10.3390/foods12030556>
4. Kazimierczak R, Gorka K, Hallmann E, Średnicka-Tober D, Lempkowska-Gocman M, Rembiałkowska E. The comparison of the bioactive compounds content in selected leafy vegetables coming from organic and conventional production. *Res Appl Agric Eng.* 2016;61:218-23.
5. Wang Y, Lin J, Tian J, Si X, Jiao X, Zhang W, et al. Blueberry malvidin-3-galactoside suppresses hepatocellular carcinoma by regulating apoptosis, proliferation, and metastasis pathways in vivo and in vitro. *J Agric Food Chem.* 2019;67(2):625-36. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b06209>
6. Di Lorenzo C, Colombo F, Biella S, Stockley C, Restani P. Polyphenols and human health: The role of bioavailability. *Nutrients.* 2021;13(1):273. <https://doi.org/10.3390/nu13010273>
7. Pérez-Lamela C, Franco I, Falqué E. Impact of high-pressure processing on antioxidant activity during storage of fruits and fruit products: A review. *Molecules.* 2021;26(17):5265. <https://doi.org/10.3390/molecules26175265>



8. Bo' C, Bernardi MR, Porrini M, Tucci M, Guglielmetti S, Cherubini A, et al. Systematic review on polyphenol intake and health outcomes: Is there sufficient evidence to define a health-promoting polyphenol-rich dietary pattern? *Nutrients*. 2019;11(6):1355. <https://doi.org/10.3390/nu11061355>
9. Bevilacqua A, Petruzzi L, Perricone M, Speranza B, Campaniello D, Sinigaglia M, et al. Nonthermal technologies for fruit and vegetable juices and beverages: Overview and advances. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2018;17(1):2-62. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12299>
10. Djekic I, Sanjuán N, Clemente G, Jambrak AR, Djukić-Vuković A, Brodnjak UV, et al. Review on environmental models in the food chain - Current status and future perspectives. *J Clean Prod*. 2018;176:1012-25. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.241>
11. Singh S, Shalini R. Effect of hurdle technology in food preservation: A review. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2016;56(4):641-49. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.761594>
12. Gabrić D, Barba FJ, Roohinejad S, Gharibzahedi SMT, Radojčin M, Putnik P, et al. Pulsed electric fields as an alternative to thermal processing for preservation of nutritive and physicochemical properties of beverages: A review. *J Food Process Eng*. 2018;41(1). <https://doi.org/10.1111/jfpe.12638>
13. Koubaa M, Barba FJ, Bursać Kovačević D, Putnik P, Santos MD, Queirós RP, et al. Pulsed electric field processing of fruit juices. In: *Fruit Juices*. Elsevier; 2018. p. 437-49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802230-6.00022-9>
14. Snyder AB, Worobo RW. The incidence and impact of microbial spoilage in the production of fruit and vegetable juices as reported by juice manufacturers. *Food Control*. 2018;85:144-50. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.09.025>
15. Tiwari BK. Ultrasound: A clean, green extraction technology. *TrAC Trends Anal Chem*. 2015;71:100-9. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.04.013>
16. Swamy GJ, Muthukumarappan K, Asokapandian S. Ultrasound for fruit juice preservation. In: *Fruit Juices*. Elsevier; 2018. p. 451-62. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802230-6.00023-0>
17. Roobab U, Aadil RM, Madni GM, Bekhit AE. The impact of nonthermal technologies on the microbiological quality of juices: A review. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2018;17(2):437-57. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12336>
18. Cervantes-Paz B, Yahia EM, Ornelas-Paz JDJ, Victoria-Campos CI, Ibarra-Junquera V, Pérez-Martínez JD, et al. Antioxidant activity and content of chlorophylls and carotenoids in raw and heat-processed Jalapeño peppers at intermediate stages of ripening. *Food Chemistry*. 2012;133(3):902-10.
19. Cheng GW, Fowke EA, Singh NP, Raghuvanshi SS. Effect of heat treatment on phenolic compounds and antioxidant capacity of grapefruit peel extracts. *J Food Sci*. 2007;72(1)
20. Odriozola-Serrano I, Soliva-Fortuny R, Hernández-Jover T, Martín-Belloso O. Impact of high-intensity pulsed electric fields or thermal treatments on quality attributes of strawberry and mango juices. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2016;37:487-93.
21. Fonteles TV, de Brito ES, Fernandes FAN, Rodrigues S. Ultrasound processing of coconut water: impact on quality and bioactivity. *Food Res Int*. 2017;77:92-9.



22. Sogi DS, Siddiq M, Roidoung S, Dolan KD. Total phenolics, carotenoids, ascorbic acid, and antioxidant properties of fresh-cut mango (*Mangifera indica* L., cv. Tommy Atkin) as affected by infrared heat treatment. *J Food Sci.* 2012;77(11). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02933.x>
23. Papoutsis K, Pristijono P, Golding JB, Stathopoulos CE, Bowyer MC, Scarlett CJ, et al. Enhancement of the total phenolic compounds and antioxidant activity of aqueous Citrus limon L. pomace extract using microwave pretreatment on the dry powder. *J Food Process Preserv.* 2017;41(5). <https://doi.org/10.1111/jfpp.13152>
24. Jiménez-Aguilar DM, Escobedo-Avellaneda Z, Martín-Belloso O, Gutiérrez-Urbe J, Valdez-Fragoso A, García-García R, et al. Effect of high hydrostatic pressure on the content of phytochemical compounds and antioxidant activity of prickly pears (*Opuntia ficus-indica*) beverages. *Food Eng Rev.* 2015;7(2):198-208. <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9111-5>
25. Chang YH, Wu SJ, Chen BY, Huang HW, Wang CY. Effect of high-pressure processing and thermal pasteurization on overall quality parameters of white grape juice. *J Sci Food Agric.* 2017;97(10):3166-72. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8160>
26. Somsong P, Duangmal K. Bioactive compounds and antioxidant activity in commercial Mao juice products in Thailand. *Acta Hort.* 2018;1213:379-86. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1213.55>
27. Putnik P, Pavlić B, Šojić B, et al. Innovative hurdle technologies for the preservation of functional fruit juices. *Foods.* 2020;9(6):699. <https://doi.org/10.3390/foods9060699>