

# Obtención de pectina empleando tecnologías emergentes de extracción verde: Revisión sistemática

## Pectin production using emerging green extraction technologies: Systematic review

Paucarchuco-Soto, Joselin<sup>1\*</sup>; Montes-Minaya, Brenda Rocío<sup>2</sup>; Phocco-Minaya, Jherry Lobaton<sup>3</sup>; Romero-Cahuana, Javier Ruben<sup>3</sup>; Turpo-Mamani, Yesenia Milagros<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma, Tarma, Perú

<sup>2</sup>Universidad Nacional Autónoma de Huanta, Huanta, Perú

<sup>3</sup>Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú

Recibido: 13/04/2025 | Aceptado: 26/05/2024 | Publicado: 27/06/2024

Correspondencia\*: 71083073@unaat.edu.pe

### RESUMEN

La pectina es un biopolímero versátil, que posee una propiedad dual de resistencia y flexibilidad, puede ser extraída de diversas fuentes orgánicas siguiendo metodologías ecológicas. El objetivo de la presente revisión fue identificar las tecnologías emergentes de extracción verde, empleadas para la obtención de pectina, así como analizar la tasa de rendimiento de extracción y los parámetros de operación adecuados para obtener pectinas con mejores características reológicas. Se empleó las bases de datos (Scopus, Scielo y Science Direct), siguiendo las directrices PRISMA y la estrategia PIO (Población, Intervención, Outputs), los cuales facilitaron formular las ecuaciones de búsqueda y a identificar los artículos más relevantes de los últimos 5 años. A través del análisis bibliométrico, se identificaron las tecnologías más prometedoras para la obtención de pectina como el ultrasonido; calentamiento óhmico; CO<sub>2</sub> supercrítico; campo eléctrico pulsado; procesamiento de alta presión; radiofrecuencia; microondas y agua subcrítica, las cuales son tecnologías verdes que ofrecen pectinas con grados de esterificación superiores al 50%, clasificándolas como altas en metoxilo. En conclusión, las tecnologías innovadoras promueven una extracción más ecológica en comparación con los métodos tradicionales, ya que implican un menor consumo energético y reducen el uso de solventes tóxicos.

**Palabras clave:** Ácido galacturónico; ecológico; grado de esterificación; tecnologías verdes; polisacárido

### ABSTRACT

Pectin is a versatile biopolymer, which possesses a dual property of strength and flexibility, and can be extracted from various organic sources following green methodologies. The objective of the present review was to identify the emerging green extraction technologies used to obtain pectin, as well as to analyze the extraction yield rate and the appropriate operating parameters to obtain pectins with better rheological characteristics. The databases (Scopus, Scielo and Science Direct) were used, following the PRISMA guidelines and the PIO strategy (Population, Intervention, Outputs), which facilitated the formulation of the search equations and the identification of the most relevant articles of the last 5 years. Through bibliometric analysis, the most promising technologies for obtaining pectin were identified as ultrasound; ohmic heating; supercritical CO<sub>2</sub>; pulsed electric field; high pressure processing; radiofrequency; microwaves and subcritical water, which are green technologies that offer pectins with degrees of esterification higher than 50%, classifying them as high in methoxyl. In conclusion, innovative technologies promote more environmentally friendly extraction compared to traditional methods, as they involve lower energy consumption and reduce the use of toxic solvents.

**Keywords:** Galacturonic acid; eco-friendly; degree of esterification; green technologies; polysaccharide

**Cómo citar este artículo:** Paucarchuco-Soto, J., Montes-Minaya, B. R., Phocco-Minaya, J. L., Romero-Cahuana, J. R. & Turpo-Mamani, Y. M. (2025). Obtención de pectina empleando tecnologías emergentes de extracción verde: Revisión sistemática. *Revista Científica Dékamu Agropec*, 6(1), 29-43. <https://doi.org/10.55996/dekamuagropec.v6i1.334>

## 1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de procesamiento emergentes para la extracción de pectina representan un enfoque importante en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica, debido a que optimizan el proceso de extracción y proporcionan las condiciones de operación adecuadas para incrementar el rendimiento de extracción y mejorar las características reológicas de la pectina extraída (Kumar et al., 2020; Pagano et al., 2021; Ran et al., 2019).

Las pectinas son un grupo de polisacáridos complejos que se encuentran en la pared celular de las plantas (Zdunek et al., 2021). Aunque la pectina se puede obtener de diversas fuentes vegetales, no presentan la misma capacidad gelificante, por lo que tiene diferentes propiedades funcionales que varían según las condiciones en las que se haya realizado la extracción (S. Zhang et al., 2025). Actualmente, la principal fuente de pectina en el ámbito industrial son el orujo de manzana y las pieles de cítricos. Sin embargo, se han realizado algunos estudios para evaluar fuentes potenciales de pectina o modificar los métodos de extracción para obtener productos con características fisicoquímicas y atributos de calidad deseados que potencien su uso en diferentes industrias (Y. Yang et al., 2018).

Los productos comerciales de pectina se clasifican en pectina de bajo metoxilo (LM) y pectina de alto metoxilo (HM) según el grado de esterificación (DE). Las pectinas LM tienen menos del 50% de grupos éster metílico, mientras que las pectinas HM tienen más del 50 % de grupos éster metílico (Duah et al., 2025). Los productos de pectina HM ofrecen más flexibilidad, y los valores DE influyen significativamente en las tasas de formación de gel y la fuerza. La fuerza del gel está relacionada con el peso molecular de la pectina, lo que significa que cuando aumenta el peso molecular promedio de la pectina, también aumenta su viscosidad, lo que conduce a una mayor fuerza del gel (Caroço et al., 2019). Por ejemplo, la pectina se usa ampliamente en la industria de alimentos y bebidas debido a su versatilidad, al proporcionar una amplia gama de aplicaciones, como la formación de gel, el espesamiento y la estabilidad física (Dranca & Oroian, 2018).

En este estudio, los indicadores clave para el análisis son: Las tecnologías emergentes utilizadas en la extracción de pectina (Ultrasonido (Polanco-Lugo et al., 2019); Calentamiento óhmico (Al-Hilphy et al., 2020); CO<sub>2</sub> supercrítico (Tsuru et al., 2021); Campo eléctrico pulsado (Gómez et al., 2019); Procesamiento de alta presión (Ninčević Grassino et al., 2020); Radiofrecuencia (Zheng et al., 2021); Microondas (Karbuz & Tugrul, 2021) y Agua subcrítica (Liew et al., 2018)) y los parámetros clave del proceso para incrementar el rendimiento de extracción de pectina.

Por tanto, este documento de revisión tiene como objetivo proporcionar una información actualizada, sobre el impacto de las tecnologías emergentes en la obtención de pectina. En este sentido, se empleó la metodología PRISMA (Urrútia & Bonfill, 2010) para la recopilación de artículos científicos de las bases de datos (Scopus, Scielo y Science Direct) y para la visualización de redes y conexiones se empleó la herramienta VOSviewer.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Estrategia de búsqueda

La información para el desarrollo del estudio se recopiló en noviembre del año 2024 bajo las directrices de la declaración PRISMA, el cual aseguro una correcta revisión sistemática. Para determinar las palabras claves se empleó la estrategia PIO (Población, Intervención, Outputs), el cual permitió identificar los términos de búsqueda clave. En tabla 1 se visualiza la ecuación de búsqueda utilizada en la revisión sistemática, siendo las bases de datos consultadas Scopus, Science Direct y Scielo.

**Tabla 1.** Aplicación de la estrategia PIO

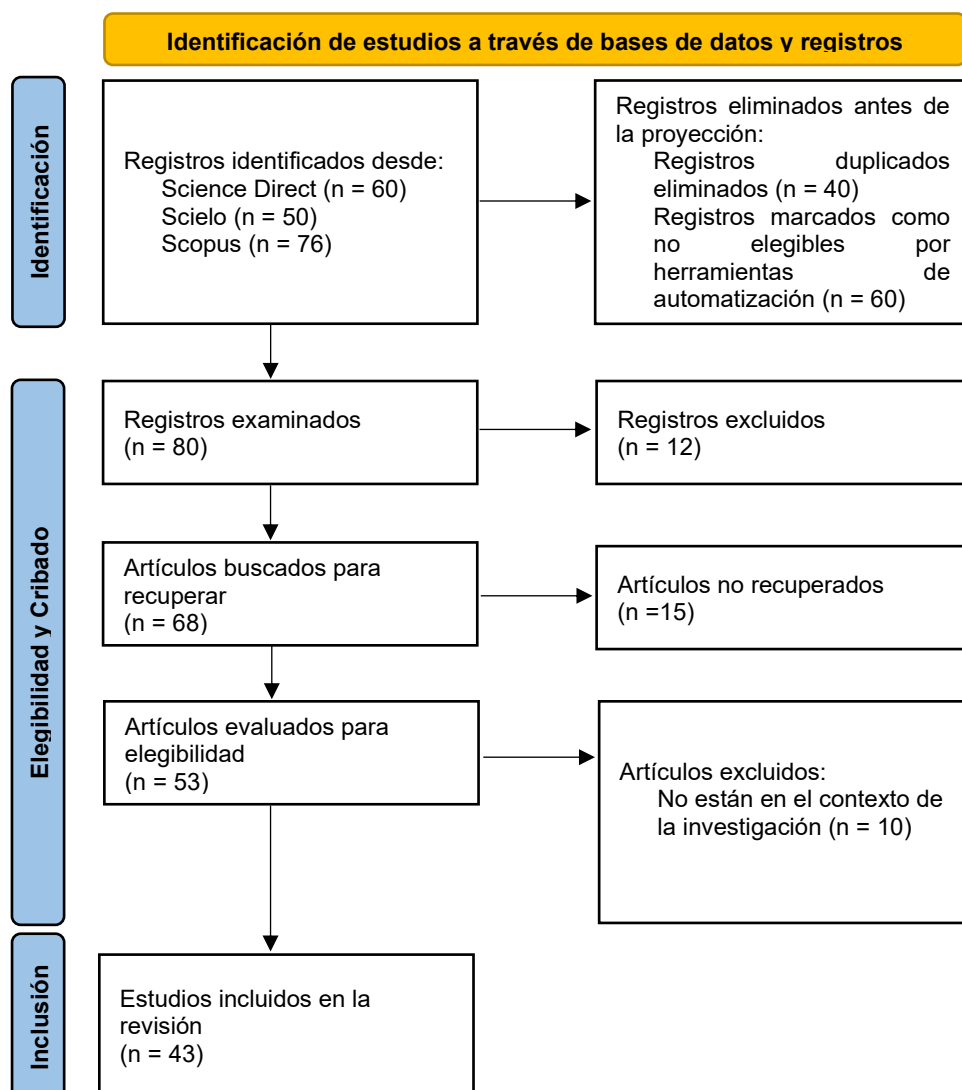
| PIO<br>Category | Keywords                                                                                                                                                                   |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Population      | “Emerging processing technologies” OR “Pectin extraction” OR “Emerging technologies in pectin extraction”                                                                  |
| Intervention    | “Ultrasound” OR “Ohmic heating” OR “Supercritical CO2” OR “Pulsed electric field” OR “High-pressure processing” OR “Radio frequency” OR “Microwave” OR “Subcritical wáter” |
| Outputs         | “Yield” OR “Key process parameters” OR “Pectin properties”                                                                                                                 |

## 2.2. Selección y extracción de información

La ecuación de búsqueda permitió recopilar información de 43 artículos científicos, los cuales contribuyeron a la fundamentación teórica. En la figura 1 se detalla el proceso de selección de los artículos, mediante un diagrama de flujo.

## 2.3. Análisis de coocurrencia de las palabras claves

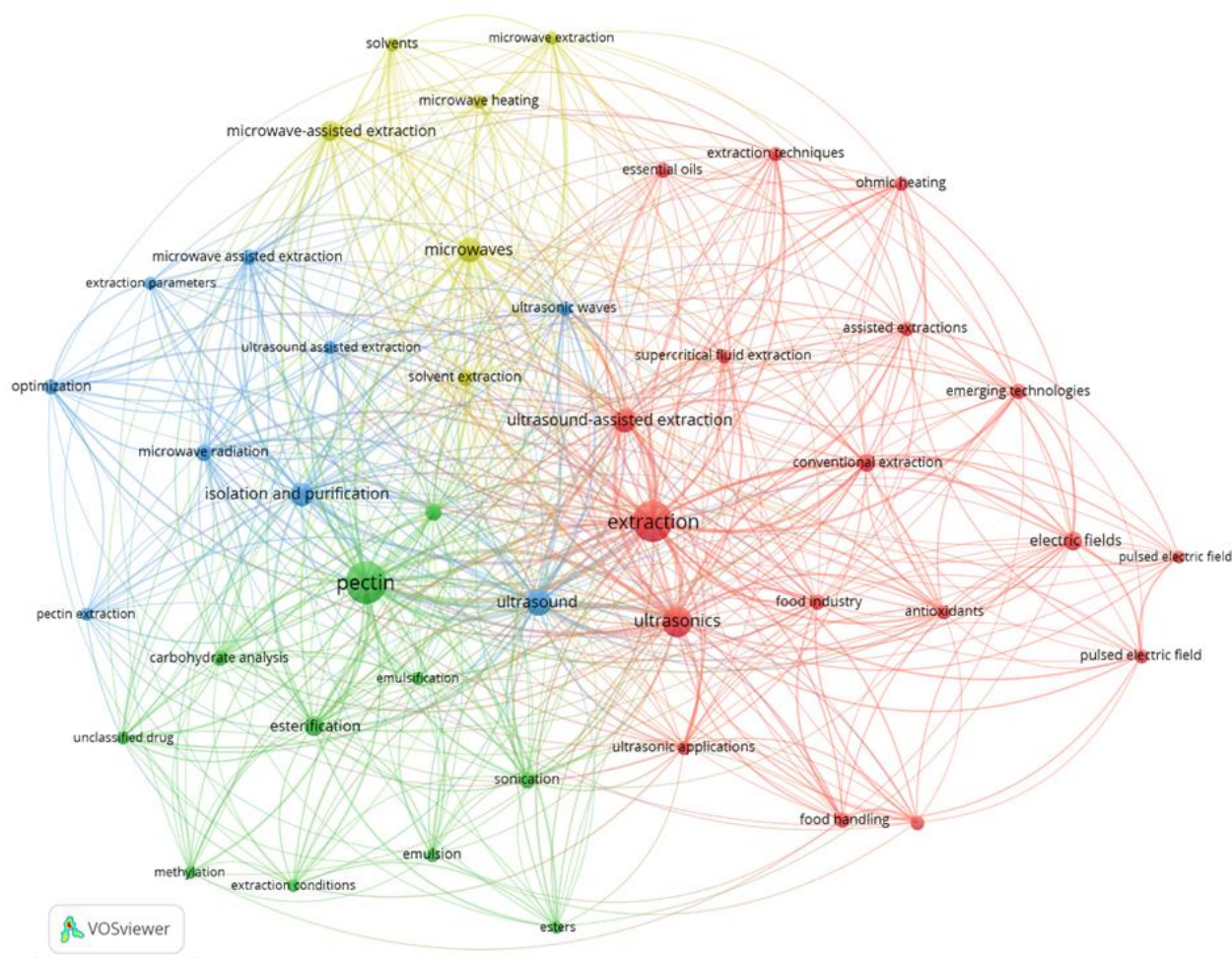
El software VOSviewer permitió identificar de manera automática las palabras clave más usadas en los 43 estudios incluidos mediante la visualización de nodos. Los nodos más grandes representan mayor frecuencia de las palabras, mientras que los vínculos entre ellos reflejan la fuerza de relación; una línea más gruesa indica un vínculo más fuerte entre las palabras.


**Figura 1.** Proceso de selección de artículos empleando la metodología PRISMA

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Análisis cualitativo y extracción de datos

La ecuación de búsqueda permitió encontrar un total de 186 documentos. Una vez identificadas todas las publicaciones, se realizó una preselección considerando el tema “Obtención de pectina empleando tecnologías emergentes de extracción verde”. Todos los resultados de búsqueda se exportaron en formato CSV y se subieron al programa VOSviewer, el cual permitió visualizar las temáticas de estudio. El análisis por palabras clave permitió establecer las áreas temáticas de las investigaciones (Figura 2). Con ello fue posible identificar las tecnologías emergentes más utilizadas para la extracción de pectina.



**Figura 2.** Visualización de red por palabras claves

#### 3.2. Extracción de pectina a partir de diversas fuentes vegetales

El procesamiento de la pectina es un procedimiento continuo que abarca diversas etapas, como la selección de la materia prima, el pretratamiento, la extracción y el posprocesamiento (Sutapa et al., 2018). En cuanto a la elección de las fuentes vegetales, se identifican dos tipos de subproductos agrícolas adecuados para su aprovechamiento funcional: por un lado, frutas descartadas que no son aptas para el consumo, ya sea por falta de madurez causada por condiciones climáticas adversas, enfermedades o plagas, o porque no cumplen con los estándares de calidad, como un desequilibrio entre lo ácido y lo dulce, la ausencia de cáscara protectora o una vida útil postcosecha limitada (Ciriminna et al., 2015); y por otro, los subproductos generados principalmente por la industria del vino (Picot-Allain et al., 2022).



Dado que la pectina es soluble en agua fría e insoluble en algunos solventes orgánicos, es necesario realizar la purificación empleando el método de precipitación hidroalcohólica. Además, una comprensión profunda del impacto de las operaciones de procesamiento posterior en la estructura y función de la pectina es esencial para diseñar mejores productos (Wan et al., 2019).

La pectina, que es principalmente un componente de la pared celular vegetal, es de gran interés comercial debido a su doble propiedad de resistencia y flexibilidad, atribuido por el contenido de ácido galacturónico parcialmente esterificado (éster metílico o esterificación del grupo acetilo). Para la extracción de compuestos bioactivos, incluida la pectina, se puede emplear la semilla, la piel, el orujo y la cáscara de frutas y verduras (Ajibade & Ijabadeniyi, 2019).

En los últimos tiempos, se han valorizado con éxito varios tipos de residuos agroindustriales, como la cáscara de frutas y verduras, el orujo, las fracciones de frutas de desecho (Barbut & Harper, 2020). La bibliografía reporta que se han realizado extracción de pectina después de secar las cáscaras de cítricos, mango, manzana y plátano recolectadas de plantas industriales. Algunos de estos residuos agroindustriales son buenas fuentes de pectina que varían en calidad y cantidad (Randriampenhaja et al., 2021).

**Tabla 2.** Fuentes vegetales de pectina

| <b>Materia prima</b>      | <b>Mango</b>                        | <b>Cítricos</b>                       | <b>Plátano</b>                                | <b>Manzana</b>                                        | <b>Remolacha</b>                                                            | <b>Maracuyá</b>                                   |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| % de pectina              | 8.8                                 | 25.5                                  | 2.8                                           | 12.5                                                  | 34.5                                                                        | 14                                                |
| % de pectato de calcio    | 7.5                                 | 24.5                                  | 2.5                                           | 10.8                                                  | 32.2                                                                        | 30.78                                             |
| Condiciones de extracción | Ácido cítrico a pH 2,0; 80 °C y 5 h | Ácido cítrico a 80 °C, 60 min, 1,5pH. | Etanol al 95 % HCl 0,05 M, 5 min, 24 h, 40 °C | 80 °C 90 min, Ácido nítrico (0,05 M) y etanol al 95 % | Pretratamiento ultrasónico/tratamiento enzimático, 70 % etanol 40 o C, 48 h | Campos eléctricos (1 KV/cm), 100 °C durante 3 min |
| Referencias               | (Karim et al., 2022)                | (Sayah et al., 2016)                  | (Rivadeneira et al., 2020)                    | (Cho et al., 2019)                                    | (K. Kumar et al., 2021)                                                     | (Aline de Moura et al., 2020)                     |

La eficiencia de extracción y las propiedades estructurales de la pectina están limitadas por muchos factores, incluido el método de extracción, los solventes, la temperatura, la presión, el pH, la relación sólido-líquido y la polaridad (Mohamed, 2016; Rubio-Senent et al., 2015). Teniendo en consideración esos aspectos, en la actualidad se está enfatizando el uso de las tecnologías emergentes para la obtención de pectina con excelentes propiedades reológicas, nutricionales y prebióticas (Gerschenson et al., 2021; X. Yang et al., 2018).

### 3.3. Tecnologías emergentes de extracción verde

Las nuevas tecnologías emergentes (TE) permiten un proceso de extracción verde, en comparación con las técnicas convencionales, debido a un menor consumo de energía y una menor utilización de solventes tóxicos (Santo Domingo et al., 2021; Sengar et al., 2020; Sucheta et al., 2020). También se consideran metodologías de extracción eficaces, no tóxicas y rentables, ayudando a promover aún más la valorización, proporcionar mayores ganancias y pectinas funcionalizadas de alta calidad (Sabater et al., 2020; Saberian et al., 2018).

Los reportes de investigación resaltan los métodos novedosos y más ecológicos para la obtención de pectina, destacando la eficacia de las tecnologías como ultrasonido; calentamiento óhmico; CO2

supercrítico; campo eléctrico pulsado; procesamiento de alta presión; radiofrecuencia; microondas y agua subcrítica.

**Tabla 3.** Principales mecanismos involucrados y parámetros clave del proceso en la obtención de pectina utilizando TE

| Tecnología de extracción         | Parámetros clave del proceso                                                                          | Principales mecanismos implicados                                                                                                                                               | Referencias                 |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Microonda                        | Potencia (W)<br>Temperatura (°C)                                                                      | El calentamiento rápido conduce al desplazamiento de moléculas polares que forman la rotación del dipolo.                                                                       | (Marić et al., 2018)        |
| Ultrasonido                      | Tiempo (min)<br>Frecuencia (kHz)<br>Potencia (W)<br>Temperatura (°C)                                  | Las ondas sónicas conducen a la formación de microburbujas y penetran en la estructura celular, lo que mejora la difusión y la transferencia de masa.                           | (Gharibzahedi et al., 2019) |
| Calentamiento óhmico             | Tiempo (min)<br>Voltaje (V/cm)<br>Temperatura (°C)                                                    | Calentamiento volumétrico, rápido y uniforme                                                                                                                                    | (Saberian et al., 2018)     |
| Radiofrecuencia                  | pH<br>Frecuencia angular (Ω)<br>Frecuencia (kHz)<br>Potencia (W)<br>Temperatura (°C)                  | Fuerte aumento de temperatura/presión intracelular.<br>Mayor capacidad de captación de GalA, ABTS, valores de color y estabilidad térmica                                       | (Zheng et al., 2021)        |
| Agua subcrítica                  | Presión (Pa)<br>Temperatura (°C)                                                                      | La alta presión facilita que las moléculas de agua penetren en los tejidos de las células vegetales.                                                                            | (F. Zhang et al., 2022)     |
| CO2 supercrítico                 | Tiempo (min)<br>Presión (Pa)<br>Temperatura (°C)<br>Difusividad (m2/s)<br>Flujo del solvente (ml/min) | Altas tasas de extracción, buenas cualidades de transporte y facilidad de difusión a través de materiales sólidos.                                                              | (Tsuru et al., 2021)        |
| Campo eléctrico pulsado          | Tiempo (min)<br>Voltaje (Kv)<br>Amperaje (A)<br>Vatios (W)                                            | Formación de poros a través de la membrana celular que mejora la transferencia de masa.                                                                                         | (Moens et al., 2020)        |
| Procesamiento de altas presiones | Presión (Pa)<br>Temperatura (°C)<br>Tiempo (min)                                                      | La distribución uniforme y rápida de la presión en toda la muestra libera la pectina. Aumento rápido de la temperatura seguido de enfriamiento simultáneo con despresurización. | (Xie et al., 2018)          |

**4. DISCUSIÓN**

**4.1. Microonda**

La obtención de pectina utilizando la tecnología de microondas (MAE), permite mejorar la eficiencia de extracción. El calor controlado generado por las microondas es importante en la extracción ya que una temperatura más alta aumentaría la velocidad de difusión y mejoraría la extracción. Expresada en vatios (W), la potencia de microondas juega un papel fundamental en la extracción de pectina (Gharibzahedi et al., 2019; Santo Domingo et al., 2021).

Esta metodología se ha empleado para realizar la extracción de pectina de la manzana elefante (*Dillenia indica*) (Kamal et al., 2020), aplicando los parámetros de potencia de microondas (170–510 W), pH (1,50–2,50), relación S/L (1:10–1:30) y tiempo de extracción (3–9 min). El rendimiento de pectina fue superior al 20%. Asimismo, se reporta que la pectina obtenida por MAE tiene un mayor grado de esterificación. Por lo tanto, MAE se considera un método ecológico para extraer pectina de *D. indica*. En otro estudio de optimización, se utilizaron vainas y cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) para extraer pectina mediante la metodología MAE, obteniendo resultados favorables (Pangestu et al., 2020).

#### 4.2. Ultrasonido

El ultrasonido se refiere al uso de ondas de sonido con frecuencias superiores a 20 kHz. Este proceso en el que se forman crece y colapsan las burbujas se conoce como cavitación. Durante la extracción, las ondas de sonido crean burbujas de cavitación cerca del tejido de la planta, lo que rompe las paredes celulares y provoca una mayor entrada de disolvente en las células, lo que ayuda a liberar el contenido celular (Shivamathi et al., 2019; Xu et al., 2018). Esta técnica se ha utilizado para extraer pectina de mandarina, pomelo (Polanco-Lugo et al., 2019), tomate (Ninčević Grassino et al., 2020), mango (Guandalini et al., 2019), y pitahaya (Zaid et al., 2020). Obteniendo buenas tasas de extracción y pectinas con buenas características reológicas (Chen et al., 2022).

#### 4.3. Calentamiento óhmico (OH)

El OH se usa ampliamente en la concentración, el escaldado, la descongelación, la extracción y la pasteurización, lo que puede aumentar la tasa de inactivación de varias enzimas importantes (polifenol oxidasa, peroxidasa y pectina metilesterasa) en frutas y hortalizas, a su vez permite mantener las características de calidad (conductividad, color, pH, calidad sensorial y sustancias bioactivas) (Tunç & Odabaş, 2021). Por lo tanto, OH tiene el potencial de aplicarse en la extracción de pectina. Esta metodología de extracción verde se aplicó para optimizar las condiciones de extracción de pectina de la granada, donde se empleó 10 V/cm durante 18 min. El rendimiento (8,16 %) y los contenidos de GalA (82,86 %) de la pectina extraída en condiciones de calentamiento energizado fueron mayores (Sharifi et al., 2022). Además, una viscosidad adecuada de la pectina OH reduce la distancia entre las moléculas y aumenta la posibilidad de formación de enlaces (Shao et al., 2021).

#### 4.4. Radiofrecuencia

El método de radiofrecuencia utiliza un electrodo móvil para regular la tasa de calentamiento. La muestra de pulpa fresca se agrega a un recipiente cilíndrico de vidrio que contiene una solución de ácido cítrico. Mediante una potencia directa de 300 W se consigue un calentamiento rápido y uniforme (Yao et al., 2021). Las condiciones óptimas de extracción reportadas para este método son una temperatura de 85 °C (185 °F), un tiempo de extracción de 15 min y un pH del solvente de 2.0. Posteriormente, la mezcla se retira del cilindro de radiofrecuencia para la recuperación de pectina (Jiao et al., 2018).

La aplicación en la extracción de pectina del orujo de manzana asistida por radiofrecuencia, donde se empleó un pH del disolvente de 2,2 (ácido cítrico), una temperatura de calentamiento de 88 °C y un tiempo de mantenimiento de 19 min, alcanzo un rendimiento de extracción de  $11,24 \pm 0,69$  (Zheng et al., 2021).

#### 4.5. Agua subcrítica

Se han desarrollado trabajos, donde se evaluó el efecto de la temperatura sobre el rendimiento y la propiedad de la pectina extraída de pulpa de manzana y cáscaras de cítricos mediante la aplicación de un enfoque de agua subcrítica (Klinchongkon et al., 2018; Muñoz-Almagro et al., 2017). El

rendimiento máximo que pudieron obtener fue del 22 % en el caso de pectina de cáscara de cítricos y del 17 % en pectina de orujo de manzana. También investigaron las propiedades exotérmicas, endotérmicas y adelgazantes de la pectina. El análisis reológico del hidrogel confirmó que la solución de pectina exhibió más propiedades elásticas ( $G' > G''$ ) con mayor frecuencia. La pectina tenía más del 60 % de DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil-hidrato) y 80 % Radicales ABTS (ácido 2,2-aminobenzotiazol-6-sulfónico) in vitro (Muñoz-Almagro et al., 2017; Zaid et al., 2019).

También se desarrollaron investigaciones en la extracción de pectina de la cáscara de la mazorca de cacao a través de enfoques de agua subcrítica (121 °C, 103,4 bar, 30 min) y ácido cítrico (pH 3,0, 95 °C, 95 min), representando esta técnica una metodología eficiente para extraer pectina con relativa rapidez (Muñoz-Almagro et al., 2019).

#### 4.6. CO<sub>2</sub> supercrítico

La extracción de pectina empleando fluidos supercríticos, permite conservar las cualidades naturales, garantiza la seguridad alimentaria, reduce el impacto ambiental y minimiza al mismo tiempo los costes energéticos (Mekala et al., 2022). Esta técnica radica en la recuperación de extractos relativamente puros y limpios especialmente útiles para alimentos funcionales (Rivas et al., 2021). Actualmente se utiliza para la recuperación de fitoquímicos a partir de subproductos vegetales como cítricos (Ndayishimiye et al., 2018).

Para la extracción de pectina de cáscaras de mandarina, se utilizó un tratamiento con dióxido de carbono supercrítico, que incluía agua desionizada en dióxido de carbono con presiones de 1–3 MPa a una temperatura de 90 °C (194 °F) durante 90 min, proporcionando un rendimiento de aproximadamente 3,8% (Tsuru et al., 2021).

#### 4.7. Campo eléctrico pulsado (PEF)

Esta tecnología se ha utilizado para varios procesos de extracción verde, como la obtención de pectina de la zanahoria (Moens et al., 2020), el jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) (Lal et al., 2021), el tomate (Chang et al., 2023) y cáscara de maracuyá (Inayati et al., 2018). En general, PEF puede mejorar la extracción de pectina, mediante la aplicación de voltaje en los materiales alimenticios que afectan la membrana celular, mejorando la permeabilidad y la velocidad de difusión. Considerando a PEF una tecnología eficiente y ecológica (Novickij et al., 2020).

#### 4.8. Procesamiento asistido por alta presión hidrostática

La alta presión hidrostática (HHP) es una tecnología típica de procesamiento no térmico que utiliza líquido (agua) como medio para transferir una presión de hasta 1000 MPa a los alimentos (Hou et al., 2022). HHP tiene un efecto superior en la desesterificación de pectina altamente eficiente (Ma et al., 2022). Algunas investigaciones trataron pectina en condiciones óptimas de HHP de 400 Mpa y 40 °C durante 12 min, y su grado de metoxilación disminuyó rápidamente de 79,91 % a 37,02 %. En comparación con el método de una sola enzima, los geles de pectina HHP mostraron una mayor fuerza de gel a la misma concentración de Ca<sup>2+</sup> y una mejor retención de agua al mismo pH. Además, la pectina desesterificada tiene una gran influencia en las propiedades reológicas y emulsionantes (Tan, Kong, et al., 2021; Tan, Li, et al., 2021; Wan et al., 2019). Por lo tanto, HHP aumenta la estabilidad del complejo péptico y la actividad prebiótica, proporcionando información sobre los cambios funcionales de la pectina en las aplicaciones (Wellala et al., 2022).

## CONCLUSIONES

Un enfoque importante en la industria alimentaria se centra en la optimización de las metodologías de extracción de pectina, teniendo como objetivo lograr mayores tasas de extracción y mejores características reológicas, nutricionales y prebióticas, además de reducir costos y generar un menor



impacto ambiental. Este estudio demostró que las tecnologías emergentes de extracción verde impactan en el rendimiento y las características moleculares de la pectina, relacionadas con el grado de esterificación y el contenido de ácido galacturónico, responsables de su comportamiento reológico.

Además, la selección de métodos de extracción de pectina adecuados no solo debe basarse en el rendimiento, sino que también debe considerar las propiedades funcionales de la pectina. Por ejemplo, mientras que algunos métodos de extracción brindan mayores rendimientos de pectina, también se da el caso que generan un producto con poca fuerza de gel. Por lo tanto, la selección de la fruta y el método de extracción depende de la funcionalidad deseada para las diferentes aplicaciones.

La revisión sistemática de la literatura permitió identificar que los métodos de extracción como el ultrasonido; calentamiento óhmico; CO<sub>2</sub> supercrítico; campo eléctrico pulsado; procesamiento de alta presión; radiofrecuencia; microondas y agua subcrítica, son técnicas promisorias que ofrecen pectinas con grados de esterificación superiores al 50%, clasificándolas como altas en metoxilo. Las frutas más utilizadas para obtener pectina son la manzana, la naranja, la pitahaya, el maracuyá y el mango, siendo la piel seca y en polvo la parte de la fruta o verdura más utilizada para su extracción, seguida de la pulpa fresca.

## FINANCIAMIENTO

Los autores no recibieron ningún patrocinio para llevar a cabo este estudio.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización y Software: Montes-Minaya, B. R.

Curación de datos y Redacción - borrador original: Phocco-Minaya, J. L.

Análisis formal: Romero Cahuana, J. R.

Investigación y Redacción - revisión y edición: Paucarchuco-Soto, J.

Metodología: Turpo Mamani, Y. M.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ajibade, B. O., & Ijabadeniyi, O. A. (2019). Effects of pectin and emulsifiers on the physical and nutritional qualities and consumer acceptability of wheat composite dough and bread. *Journal of Food Science and Technology*, 56(1), 83–92. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3457-7>
- Al-Hilphy, A. R., Al-Musafer, A. M., & Gavahian, M. (2020). Pilot-scale ohmic heating-assisted extraction of wheat bran bioactive compounds: Effects of the extract on corn oil stability. *Food Research International*, 137, 109649. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109649>
- Aline de Moura, F., Macagnan, F. T., Lúcia de Oliveira Petkowicz, C., & Picolli da Silva, L. (2020). Partially hydrolyzed pectin extracted from passion fruit peel: Molar mass and physicochemical properties. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 21, 100206. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2019.100206>
- Barbut, S., & Harper, A. (2020). Influence of relative humidity on dried Ca<sup>++</sup>-alginate films and composites made with soy and pectin. *Italian Journal of Food Science*, 32(1), 195–208.

<https://doi.org/10.14674/IJFS-1652>

- Caroço, R. F., Kim, B., Santacoloma, P. A., Abildskov, J., Lee, J. H., & Huusom, J. K. (2019). Analysis and model-based optimization of a pectin extraction process. *Journal of Food Engineering*, 244, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.09.016>
- Chang, C.-K., Tsai, S.-Y., Gavahian, M., Cheng, K.-C., Hou, C.-Y., Yudhistira, B., Lin, S.-H., Santoso, S. P., & Hsieh, C.-W. (2023). Direct and alternating current electric fields affect pectin esterase and cellulase in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 205, 112495. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112495>
- Chen, S., Xiao, L., Li, S., Meng, T., Wang, L., & Zhang, W. (2022). The effect of sonication-synergistic natural deep eutectic solvents on extraction yield, structural and physicochemical properties of pectins extracted from mango peels. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86, 106045. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106045>
- Cho, E.-H., Jung, H.-T., Lee, B.-H., Kim, H.-S., Rhee, J.-K., & Yoo, S.-H. (2019). Green process development for apple-peel pectin production by organic acid extraction. *Carbohydrate Polymers*, 204, 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.09.086>
- Ciriminna, R., Chavarría-Hernández, N., Inés Rodríguez Hernández, A., & Pagliaro, M. (2015). Pectin: A new perspective from the biorefinery standpoint. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(4), 368–377. <https://doi.org/10.1002/bbb.1551>
- Dranca, F., & Oroian, M. (2018). Extraction, purification and characterization of pectin from alternative sources with potential technological applications. *Food Research International*, 113, 327–350. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.065>
- Duah, J., Agbenorhevi, J. K., Kpodo, F. M., & Saalia, F. K. (2025). Structural and functional properties of pectin extracted from African star apple. *Food Chemistry Advances*, 7, 101007. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.101007>
- Gerschenson, L. N., Fissore, E. N., Rojas, A. M., Idrovo Encalada, A. M., Zukowski, E. F., & Higuera Coelho, R. A. (2021). Pectins obtained by ultrasound from agroindustrial by-products. *Food Hydrocolloids*, 118, 106799. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106799>
- Gharibzahedi, S. M. T., Smith, B., & Guo, Y. (2019). Ultrasound-microwave assisted extraction of pectin from fig (*Ficus carica* L.) skin: Optimization, characterization and bioactivity. *Carbohydrate Polymers*, 222, 114992. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.114992>
- Gómez, B., Munekata, P. E. S., Gavahian, M., Barba, F. J., Martí-Quijal, F. J., Bolumar, T., Campagnol, P. C. B., Tomasevic, I., & Lorenzo, J. M. (2019). Application of pulsed electric fields in meat and fish processing industries: An overview. *Food Research International*, 123, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.047>
- Guandalini, B. B. V., Rodrigues, N. P., & Marczak, L. D. F. (2019). Sequential extraction of phenolics and pectin from mango peel assisted by ultrasound. *Food Research International*, 119, 455–461. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.011>
- Hou, Z., Luan, L., Hu, X., Chen, S., & Ye, X. (2022). Beneficial effects of high pressure processing on the interaction between RG-I pectin and cyanidin-3-glucoside. *Food Chemistry*, 383, 132373. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132373>
- Inayati, Puspita, R. I., & Fajrin, V. L. (2018). *Extraction of pectin from passion fruit rind (Passiflora edulis var. flavicarpa Degener) for edible coating*. 030002. <https://doi.org/10.1063/1.5024061>
- Jiao, Y., Tang, J., Wang, Y., & Koral, T. L. (2018). Radio-Frequency Applications for Food Processing and Safety. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9(1), 105–127. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-041715-033038>

- Kamal, M. M., Ali, M. R., Hossain, A., & Shishir, M. R. I. (2020). Optimization of microwave-assisted extraction of pectin from *Dillenia indica* fruit and its preliminary characterization. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(6). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14466>
- Karbu, P., & Tugrul, N. (2021). Microwave and ultrasound assisted extraction of pectin from various fruits peel. *Journal of Food Science and Technology*, 58(2), 641–650. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04578-0>
- Karim, R., Nahar, K., Zohora, F. T., Islam, M. M., Bhuiyan, R. H., Jahan, M. S., & Shaikh, M. A. A. (2022). Pectin from lemon and mango peel: Extraction, characterisation and application in biodegradable film. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 4, 100258. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100258>
- Klinchongkon, K., Khuwijitjaru, P., & Adachi, S. (2018). Properties of subcritical water-hydrolyzed passion fruit ( *Passiflora edulis* ) pectin. *Food Hydrocolloids*, 74, 72–77. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.07.034>
- Kumar, K., Srivastav, S., & 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>
- Kumar, M., Tomar, M., Saurabh, V., Mahajan, T., Punia, S., Contreras, M. del M., Rudra, S. G., Kaur, C., & Kennedy, J. F. (2020). Emerging trends in pectin extraction and its anti-microbial functionalization using natural bioactives for application in food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 223–237. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.009>
- Lal, A. M. N., Prince, M. V., Kothakota, A., Pandiselvam, R., Thirumdas, R., Mahanti, N. K., & Sreeja, R. (2021). Pulsed electric field combined with microwave-assisted extraction of pectin polysaccharide from jackfruit waste. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 74, 102844. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102844>
- Liew, S. Q., Teoh, W. H., Tan, C. K., Yusoff, R., & Ngoh, G. C. (2018). Subcritical water extraction of low methoxyl pectin from pomelo (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) peels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 116, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.013>
- Ma, J., Tong, P., Chen, Y., Wang, Y., Ren, H., Gao, Z., Yue, T., & Long, F. (2022). The inhibition of pectin oligosaccharides on degranulation of RBL-2H3 cells from apple pectin with high hydrostatic pressure assisted enzyme treatment. *Food Chemistry*, 371, 131097. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131097>
- Marić, M., Grassino, A. N., Zhu, Z., Barba, F. J., Brnčić, M., & Rimac Brnčić, S. (2018). An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from plant food wastes and by-products: Ultrasound-, microwaves-, and enzyme-assisted extraction. *Trends in Food Science & Technology*, 76, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.022>
- Mekala, S., Silva, E. K., & Saldaña, M. D. A. (2022). Ultrasound-assisted production of emulsion-filled pectin hydrogels to encapsulate vitamin complex: Impact of the addition of xylooligosaccharides, ascorbic acid and supercritical CO<sub>2</sub> drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 76, 102907. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102907>
- Moens, L. G., De Laet, E., Van Wambeke, J., Van Loey, A. M., & Hendrickx, M. E. G. (2020). Pulsed electric field and mild thermal processing affect the cooking behaviour of carrot tissues (*Daucus carota*) and the degree of methylesterification of carrot pectin. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 102483. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102483>
- Mohamed, H. (2016). Extraction and Characterization of Pectin from Grapefruit Peels. *MOJ Food Processing & Technology*, 2(1). <https://doi.org/10.15406/mojfpt.2016.02.00029>
- Muñoz-Almagro, N., Montilla, A., Moreno, F. J., & Villamiel, M. (2017). Modification of citrus and apple pectin by power ultrasound: Effects of acid and enzymatic treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 807–819. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.11.039>

- Muñoz-Almagro, N., Valadez-Carmona, L., Mendiola, J. A., Ibáñez, E., & Villamiel, M. (2019). Structural characterisation of pectin obtained from cacao pod husk. Comparison of conventional and subcritical water extraction. *Carbohydrate Polymers*, 217, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.040>
- Ndayishimiye, J., Lim, D. J., & Chun, B. S. (2018). Antioxidant and antimicrobial activity of oils obtained from a mixture of citrus by-products using a modified supercritical carbon dioxide. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 57, 339–348. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.08.041>
- Ninčević Grassino, A., Ostojić, J., Miletić, V., Djaković, S., Bosiljkov, T., Zorić, Z., Ježek, D., Rimac Brnčić, S., & Brnčić, M. (2020). Application of high hydrostatic pressure and ultrasound-assisted extractions as a novel approach for pectin and polyphenols recovery from tomato peel waste. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 102424. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102424>
- Novickij, V., Stanevičienė, R., Staigvila, G., Gruškienė, R., Sereikaitė, J., Girkontaitė, I., Novickij, J., & Servienė, E. (2020). Effects of pulsed electric fields and mild thermal treatment on antimicrobial efficacy of nisin-loaded pectin nanoparticles for food preservation. *LWT*, 120, 108915. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108915>
- Pagano, I., Campone, L., Celano, R., Piccinelli, A. L., & Rastrelli, L. (2021). Green non-conventional techniques for the extraction of polyphenols from agricultural food by-products: A review. *Journal of Chromatography A*, 1651, 462295. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2021.462295>
- Pangestu, R., Amanah, S., Juanssilfero, A. B., Yopi, & Perwitasari, U. (2020). Response surface methodology for microwave-assisted extraction of pectin from cocoa pod husk (*Theobroma cacao*) mediated by oxalic acid. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(4), 2126–2133. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00459-4>
- Picot-Allain, M. C. N., Ramasawmy, B., & Emmambux, M. N. (2022). Extraction, Characterisation, and Application of Pectin from Tropical and Sub-Tropical Fruits: A Review. *Food Reviews International*, 38(3), 282–312. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1733008>
- Polanco-Lugo, E., Martínez-Castillo, J. I., Cuevas-Bernardino, J. C., González-Flores, T., Valdez-Ojeda, R., Pacheco, N., & Ayora-Talavera, T. (2019). Citrus pectin obtained by ultrasound-assisted extraction: Physicochemical, structural, rheological and functional properties. *CyTA - Journal of Food*, 17(1), 463–471. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1600036>
- Ran, X., Zhang, M., Wang, Y., & Adhikari, B. (2019). Novel technologies applied for recovery and value addition of high value compounds from plant byproducts: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(3), 450–461. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1377149>
- Randriampenhaja, A. R. J., Rasolohery, C. A., Rakotovo, M., & Rasoarahona, J. R. E. (2021). Influences of the pH, the liquid/solid ratio, and the mixing of the wastes of mango, passion fruit and Bambara groundnut on the extraction yield of pectin. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 11(7), 226–235. <https://doi.org/10.29322/IJSRP.11.07.2021.p11529>
- Rivadeneira, J. P., Wu, T., Ybanez, Q., Dorado, A. A., Migo, V. P., Nayve, F. R. P., & Castillo-Israel, K. A. T. (2020). Microwave-Assisted Extraction of Pectin from “Saba” Banana Peel Waste: Optimization, Characterization, and Rheology Study. *International Journal of Food Science*, 2020, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/8879425>
- Rivas, M. Á., Casquete, R., de Guía Córdoba, M., Benito, M. J., Hernández, A., Ruiz-Moyano, S., & Martín, A. (2021). Functional properties of extracts and residual dietary fibre from pomegranate (*Punica granatum* L.) peel obtained with different supercritical fluid conditions. *LWT*, 145, 111305. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111305>



- Rubio-Senent, F., Rodríguez-Gutiérrez, G., Lama-Muñoz, A., & Fernández-Bolaños, J. (2015). Pectin extracted from thermally treated olive oil by-products: Characterization, physico-chemical properties, in vitro bile acid and glucose binding. *Food Hydrocolloids*, 43, 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.06.001>
- Sabater, C., Sabater, V., Olano, A., Montilla, A., & Corzo, N. (2020). Ultrasound-assisted extraction of pectin from artichoke by-products. An artificial neural network approach to pectin characterisation. *Food Hydrocolloids*, 98, 105238. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105238>
- Saberian, H., Hamidi-Esfahani, Z., Ahmadi Gavligi, H., Banakar, A., & Barzegar, M. (2018). The potential of ohmic heating for pectin extraction from orange waste. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(2), e13458. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13458>
- Santo Domingo, C., Otálora González, C., Navarro, D., Stortz, C., Rojas, A. M., Gerschenson, L. N., & Fissore, E. N. (2021). Enzyme assisted extraction of pectin and inulin enriched fractions isolated from microwave treated *Cynara cardunculus* tissues. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(1), 242–249. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14625>
- Sayah, M. Y., Chabir, R., Benyahia, H., Rodi Kandri, Y., Ouazzani Chahdi, F., Touzani, H., & Errachidi, F. (2016). Yield, Esterification Degree and Molecular Weight Evaluation of Pectins Isolated from Orange and Grapefruit Peels under Different Conditions. *PLOS ONE*, 11(9), e0161751. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161751>
- Sengar, A. S., Rawson, A., Muthiah, M., & Kalakandan, S. K. (2020). Comparison of different ultrasound assisted extraction techniques for pectin from tomato processing waste. *Ultrasonics Sonochemistry*, 61, 104812. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104812>
- Shao, L., Zhao, Y., Zou, B., Li, X., & Dai, R. (2021). Ohmic heating in fruit and vegetable processing: Quality characteristics, enzyme inactivation, challenges and prospective. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 601–616. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.009>
- Sharifi, A., Hamidi-Esfahani, Z., Ahmadi Gavligi, H., & Saberian, H. (2022). Assisted ohmic heating extraction of pectin from pomegranate peel. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 172, 108760. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108760>
- Shivamathi, C. S., Moorthy, I. G., Kumar, R. V., Soosai, M. R., Maran, J. P., Kumar, R. S., & Varalakshmi, P. (2019). Optimization of ultrasound assisted extraction of pectin from custard apple peel: Potential and new source. *Carbohydrate Polymers*, 225, 115240. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115240>
- Sucheta, Misra, N. N., & Yadav, S. K. (2020). Extraction of pectin from black carrot pomace using intermittent microwave, ultrasound and conventional heating: Kinetics, characterization and process economics. *Food Hydrocolloids*, 102, 105592. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105592>
- Sutapa, B. M., Dhruti, Avlani, P. G., & Gopa, R. B. (2018). Therapeutic and pharmaceutical benefits of native and modified plant pectin. *Journal of Medicinal Plants Research*, 12(1), 1–6. <https://doi.org/10.5897/JMPR2017.6542>
- Tan, C., Kong, Y., Tong, Y., Deng, H., Wang, M., Zhao, Y., Wan, M., Lin, S., Liu, X., Meng, X., & Ma, Y. (2021). Anti-apoptotic effects of high hydrostatic pressure treated cyanidin-3-glucoside and blueberry pectin complexes on lipopolysaccharide-induced inflammation in Caco-2 cells. *Journal of Functional Foods*, 86, 104709. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104709>
- Tan, C., Li, D., Wang, H., Tong, Y., Zhao, Y., Deng, H., Kong, Y., Shu, C., Yan, T., & Meng, X. (2021). Effects of high hydrostatic pressure on the binding capacity, interaction, and antioxidant activity of the binding products of cyanidin-3-glucoside and blueberry pectin. *Food Chemistry*, 344, 128731. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128731>
- Tsuru, C., Umada, A., Noma, S., Demura, M., & Hayashi, N. (2021). Extraction of Pectin from



- Satsuma Mandarin Orange Peels by Combining Pressurized Carbon Dioxide and Deionized Water: a Green Chemistry Method. *Food and Bioprocess Technology*, 14(7), 1341–1348. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02644-9>
- Tunç, M. T., & Odabaş, H. İ. (2021). Single-step recovery of pectin and essential oil from lemon waste by ohmic heating assisted extraction/hydrodistillation: A multi-response optimization study. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 74, 102850. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102850>
- Urrútia, G., & Bonfill, X. (2010). Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. *Medicina Clínica*, 135(11), 507–511. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2010.01.015>
- Wan, L., Chen, Q., Huang, M., Liu, F., & Pan, S. (2019). Physiochemical, rheological and emulsifying properties of low methoxyl pectin prepared by high hydrostatic pressure-assisted enzymatic, conventional enzymatic, and alkaline de-esterification: A comparison study. *Food Hydrocolloids*, 93, 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.022>
- Wellala, C. K. D., Bi, J., Liu, X., Wu, X., Lyu, J., Liu, J., Liu, D., & Guo, C. (2022). Effect of high pressure homogenization on water-soluble pectin characteristics and bioaccessibility of carotenoids in mixed juice. *Food Chemistry*, 371, 131073. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131073>
- Xie, F., Zhang, W., Lan, X., Gong, S., Wu, J., & Wang, Z. (2018). Effects of high hydrostatic pressure and high pressure homogenization processing on characteristics of potato peel waste pectin. *Carbohydrate Polymers*, 196, 474–482. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.05.061>
- Xu, S.-Y., Liu, J.-P., Huang, X., Du, L.-P., Shi, F.-L., Dong, R., Huang, X.-T., Zheng, K., Liu, Y., & Cheong, K.-L. (2018). Ultrasonic-microwave assisted extraction, characterization and biological activity of pectin from jackfruit peel. *LWT*, 90, 577–582. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.007>
- Yang, X., Nisar, T., Liang, D., Hou, Y., Sun, L., & Guo, Y. (2018). Low methoxyl pectin gelation under alkaline conditions and its rheological properties: Using NaOH as a pH regulator. *Food Hydrocolloids*, 79, 560–571. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.12.006>
- Yang, Y., Wang, Z., Hu, D., Xiao, K., & Wu, J.-Y. (2018). Efficient extraction of pectin from sisal waste by combined enzymatic and ultrasonic process. *Food Hydrocolloids*, 79, 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.11.051>
- Yao, Y., Sun, Y., Cui, B., Fu, H., Chen, X., & Wang, Y. (2021). Radio frequency energy inactivates peroxidase in stem lettuce at different heating rates and associate changes in physiochemical properties and cell morphology. *Food Chemistry*, 342, 128360. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128360>
- Zaid, R. M., Mishra, P., Siti Noredyani, A. R., Tabassum, S., Ab Wahid, Z., & Mimi Sakinah, A. M. (2020). Proximate characteristics and statistical optimization of ultrasound-assisted extraction of high-methoxyl-pectin from *Hylocereus polyrhizus* peels. *Food and Bioprocess Technology*, 123, 134–149. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.06.011>
- Zaid, R. M., Mishra, P., Tabassum, S., Wahid, Z. A., & Sakinah, A. M. M. (2019). High methoxyl pectin extracts from *Hylocereus polyrhizus*'s peels: Extraction kinetics and thermodynamic studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 141, 1147–1157. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.017>
- Zdunek, A., Pieczywek, P. M., & Cybulska, J. (2021). The primary, secondary, and structures of higher levels of pectin polysaccharides. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(1), 1101–1117. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12689>
- Zhang, F., Zhang, L., Chen, J., Du, X., Lu, Z., Wang, X., Yi, Y., Shan, Y., Liu, B., Zhou, Y., Wang,

X., & Lü, X. (2022). Systematic evaluation of a series of pectic polysaccharides extracted from apple pomace by regulation of subcritical water conditions. *Food Chemistry*, 368, 130833. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130833>

Zhang, S., Wu, J., Zheng, J., Peng, Y., Zhao, J., Pan, X., & Lao, F. (2025). Deep eutectic solvents/water systems in different pH for extracting pectin from mango peel: Analysis of physicochemical and structural properties. *Food Hydrocolloids*, 168, 111578. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111578>

Zheng, J., Li, H., Wang, D., Li, R., Wang, S., & Ling, B. (2021). Radio frequency assisted extraction of pectin from apple pomace: Process optimization and comparison with microwave and conventional methods. *Food Hydrocolloids*, 121, 107031. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107031>