

Tecnologías emergentes para la extracción de pectina a partir de residuos agroindustriales: Una revisión sistemática y bibliométrica

Emerging technologies for pectin extraction from agro-industrial waste: A systematic and bibliometric review

Lesly Yata-Franco^{1*}; Laumer Tocto-Yajahuanca¹; Rafael Julián Malpartida-Yapias¹

¹ Grupo de investigación Innovadores dinamizando la agroindustria y los agronegocios, Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma (UNAAAT), Acobamba 120702, Perú.

* Autor corresponsal: 73619310@unaat.edu.pe (L. Yata-Franco).

ORCID de los autores:

L. Yata-Franco: <https://orcid.org/0000-0002-8633-3097>

L. Tocto-Yajahuanca: <https://orcid.org/0000-0001-7973-8320>

R. J. Malpartida-Yapias: <https://orcid.org/0000-0002-2222-4879>

ABSTRACT

En los últimos años se ha incrementado el interés por la extracción de pectina a partir de residuos agroindustriales. No obstante, los métodos convencionales emplean disolventes tóxicos, tiempos prolongados y elevados requerimientos energéticos, lo que ha impulsado la adopción de tecnologías emergentes más sostenibles. El objetivo de esta revisión fue analizar sistemáticamente las técnicas más eficientes para la extracción de pectina, con énfasis en ultrasonido (UAE) y microondas (MAE). La búsqueda en Scopus y ScienceDirect, bajo la metodología PRISMA, permitió seleccionar 43 estudios publicados entre 2020 y abril de 2025. Los resultados evidencian que las tecnologías emergentes, permiten obtener mayor rendimiento, ahorro de tiempo y energía, además de minimizar el impacto ambiental y maximizar la calidad de la pectina en comparación con la extracción convencional. Con base en los estudios analizados, investigaciones futuras deben orientarse a la integración de estas tecnologías, tanto de manera secuencial como simultánea, con el fin de maximizar aún más el rendimiento y la calidad de la pectina. Además, es necesario optimizar parámetros operativos, evaluar su desempeño a escala piloto e industrial y considerar su viabilidad económica y ambiental, consolidando así su aplicación en la valorización de residuos agroindustriales hacia procesos más sostenibles y circulares.

Keywords: Residuos agroalimentarios; ultrasonido; microondas; polisacáridos; extracción verde.

ABSTRACT

In recent years, there has been growing interest in extracting pectin from agro-industrial waste. However, conventional methods use toxic solvents, require long processing times, and consume large amounts of energy, which has led to the adoption of more sustainable emerging technologies. The objective of this review was to systematically analyze the most efficient techniques for pectin extraction, with an emphasis on ultrasound (UAE) and microwave (MAE). A search in Scopus and ScienceDirect, using the PRISMA methodology, allowed us to select 43 studies published between 2020 and April 2025. The results show that emerging technologies allow for higher yields, time and energy savings, as well as minimizing environmental impact and maximizing pectin quality compared to conventional extraction. Based on the studies analyzed, future research should focus on the integration of these technologies, both sequentially and simultaneously, in order to further maximize pectin yield and quality. In addition, it is necessary to optimize operating parameters, evaluate their performance on a pilot and industrial scale, and consider their economic and environmental viability, thus consolidating their application in the valorization of agro-industrial waste towards more sustainable and circular processes.

Keywords: agri-food waste; ultrasound; microwave; polysaccharide; green extraction.

Recibido: 10-07-2025.

Aceptado: 10-09-2025.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

La pectina es un polisacárido compuesto por cadenas lineales de ácido D-galacturónico unidas por enlaces glicosídicos α (1-4) (Fiedot et al., 2024). Se encuentra de forma natural en las paredes celulares de las verduras y en mayor proporción en las frutas (Rahman et al., 2023; Yu et al., 2024). La pectina se utiliza como espesante, gelificante y estabilizador en diversos procesos y productos alimenticios, además de su aplicación en recubrimientos comestibles y materiales de envasado (Divyashri et al., 2023; Maqbool et al., 2023).

En los últimos años, ha aumentado la extracción de pectina a partir de residuos agroindustriales, siendo las cáscaras de cítricos las más utilizadas, las cuales representan el 85 % de la producción (Mamiru & Gonfa, 2023). A nivel industrial, la hidrólisis ácida es el método más utilizado para la extracción de pectina. Este método consiste en procesar el material en condiciones ácidas (pH 2,0 a 3,5), altas temperaturas (70 a 90 °C) durante períodos prolongados (2 a 6 h) y utilizando ácidos inorgánicos (Vathsala et al., 2024). Los ácidos más utilizados son el sulfúrico, el clorhídrico y el nítrico, que afectan al entorno ambiental porque durante el proceso se generan aguas residuales (Iñiguez-Moreno et al., 2024; Zioga et al., 2022).

A pesar de su amplio uso, este método suele requerir un mayor consumo de energía, además de generar degradación de la pectina (Fernández et al., 2023; Hernandez et al., 2024). Para superar estas limitaciones, han surgido enfoques alternativos como tecnologías emergentes que han demostrado ser métodos de extracción más eficientes, respetuosos con el entorno ambiental y sostenibles (Wani & Uppaluri, 2023).

Dentro de estas tecnologías estas la extracción asistida por microondas (MAE), los ultrasonidos (UAE) y los fluidos supercríticos (SCFA). La UAE es una tecnología de procesamiento emergente y verde (Hernandez et al., 2024), esta tecnología implica la aplicación de ondas sonoras de alta frecuencia a un medio líquido que contiene el material vegetal (Durga et al., 2025). Estas ondas generan cavitación acústica (formación y colapso de microburbujas). El colapso de las microburbujas genera causa un incremento local en la presión y temperatura (Dixit et al., 2025), provocando una

rotura de las paredes celulares del material vegetal. Esto posibilita una mejor penetración del disolvente en la matriz celular, favoreciendo la liberación de la pectina y otros compuestos intracelulares al medio de extracción (de Souza et al., 2025).

Por su parte, la MAE emplea la radiación electromagnética para calentar de manera rápida el solvente, que posteriormente transmite calor al material vegetal. Este proceso de calor produce presión intracelular que fractura las estructuras celulares del material vegetal, liberando sustancias como la pectina (Haque et al., 2025). Al romperse la estructura celular, el disolvente empleado penetra con más facilidad en el tejido, disuelve de manera más efectiva la pectina y facilita su extracción más eficiente (Choudhury et al., 2025).

Estas tecnologías mejoran el rendimiento, la calidad de la pectina, reducen los costes energéticos, acortan el tiempo de extracción, así como utilizan menos disolventes y han demostrado ser una alternativa más respetuosa con el medio ambiente (Muñoz et al., 2023). En este contexto, la presente revisión plantea la siguiente pregunta: ¿Cuáles son las tecnologías emergentes más eficientes y sostenibles para la extracción de pectina a partir de residuos agroindustriales?

Esta investigación responde a la búsqueda de métodos más eficientes para el uso sostenible de los residuos agroindustriales, optimizando el rendimiento y reduciendo el impacto medioambiental (Panwar et al., 2023). De las tres tecnologías mencionadas anteriormente, la UAE y la MAE son las más utilizadas debido a sus altos rendimientos en la obtención de pectina. En ese sentido, la revisión ofrece una visión estratégica para futuras investigaciones que buscan aplicar métodos emergentes en la extracción de pectina a partir de residuos, abriendo nuevos enfoques en la ingeniería agroindustrial hacia soluciones más eficientes y sostenibles.

Por tanto, el objetivo de la presente revisión es analizar e identificar las tecnologías emergentes más eficientes y sostenibles para la extracción de pectina a partir de residuos agroindustriales, con especial énfasis en la extracción asistida por ultrasonidos, fluidos supercríticos y microondas, tal disponible en la literatura científica.

METODOLOGÍA

La investigación sistemática se llevó a cabo siguiendo la metodología PRISMA (Quispe et al., 2021). La información se recopiló en abril de 2025 a partir de las siguientes bases de datos: Scopus y Science Direct, utilizando términos clave como: waste, pectin, microwave, supercritical and ultrasound, junto a operadores booleanos (AND, OR).

Criterios de elegibilidad

Para la revisión, se incluyeron los estudios experimentales publicados entre 2020 y 2025 que involucraban al menos una tecnología emergente para la extracción de pectina (microondas, supercrítica y ultrasonido), aplicado solo a resi-

duos agroindustriales. Asimismo, se excluyeron los libros, artículos de revisión y estudios relacionados con las áreas de energía, física y farmacología, ya que no están relacionados con el tema de investigación.

Extracción y análisis de datos

Este proceso fue realizado de forma independiente por tres revisores; cualquier discrepancia se resolvió por consenso. Para la selección y extracción de datos se utilizaron la plataforma en línea Rayyan IA y Ms Excel. Todos los estudios incluidos se almacenaron en el gestor bibliográfico Mendeley.

Selección de estudios

Mediante la ecuación de búsqueda, se encontraron 1470 artículos y, tras el filtrado automático de

duplicados con Rayyan IA, tres revisores realizaron un análisis de cada estudio según los criterios de elegibilidad (Figura 1).

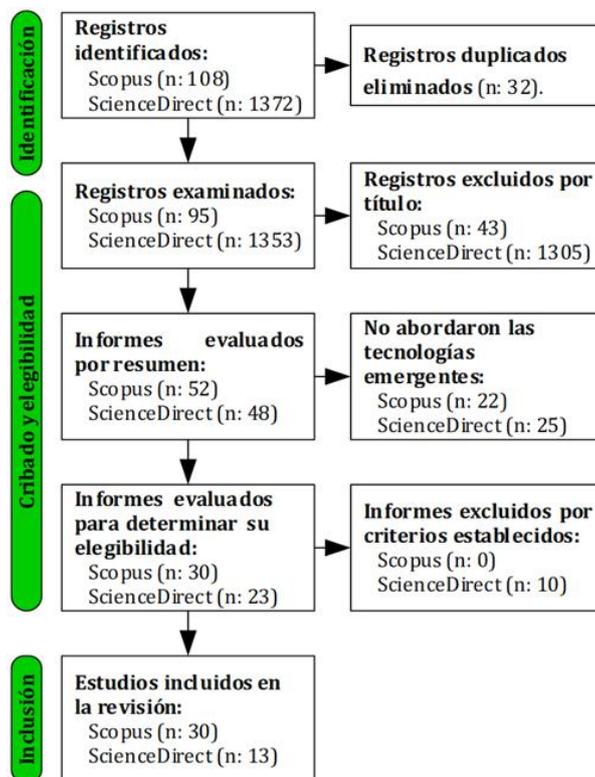


Figura 1. Identificación de estudios a través de bases de datos y registros

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características y síntesis de los estudios incluidos

La Tabla 1 presenta cronológicamente los estudios incluidos, donde se clasifican en categorías como

tipo de tecnología emergente, tipo de residuo, condición del proceso, rendimiento y autor.

Table 1
Results of the characteristics of the included studies

Nº	Tecnología emergente	Tipo de residuo agroindustrial	Condiciones de proceso	Rendimiento (%)	Referencia
1	MAE	Cáscaras de cacao	Potencia: 400 W θ: 15 min pH: 1,16	9,64	(Pangestu et al., 2020)
2	UAE	Cáscaras de plátano	Tº: 195 °C pH: 3 θ: 60 s	14,2	(Rivadeneira et al., 2020)
3	MAE	Residuos de papa	Potencia: 800 W θ: 4 min Tº: 90 °C pH: 1,5	14,34	(Arrutia et al., 2020)
4	UAE	Cáscaras de nueces verdes	Potencia: 200 W θ:10 min pH: 1,5	12,78	(Asgari et al., 2020)
5	MAE	Pulpa de zanahoria negra	Potencia: 900 W θ: 5 min Tº: 110 °C pH: 2,5	4,3	(Sucheta et al., 2020)
	UAE		Potencia: 550 W θ: 30 min Tº: 70 °C pH: 2,5	2,8	
6	MAE	Cáscara de limón dulce	Potencia: 700 W θ: 3 min pH: 1,5	25,31	(Rahmani et al., 2020)

7	UAE	Cáscara de sandía	Potencia: 525 W T°: 70 °C θ: 10 min pH: 2,5	19,67	(Lim et al., 2020)
8	MAE	Residuos de tomate	Potencia: 900 W θ: 3,34 min T: 88,7 °C pH: 1,5	25,42	(Sengar et al., 2020)
	UAE		Potencia: 600 W θ: 8.61 min T°: 60 °C pH: 1,5	15,21	
9	MAE	Cáscara pitahaya roja	Potencia: 183 W θ:12 min pH: 1,9	17,01	(Thu Dao et al., 2021)
		Cáscara pitahaya blanca	Potencia: 183 W θ:10 min pH: 3	13,22	
		Cáscara maracuyá	Potencia: 183 W θ:12 min pH: 1,9	18,73	
10	MAE	Cáscara de yaca	Potencia: 647,30 W θ: 5 min pH: 2,1	18,24	(Lal et al., 2021)
11	UAE	Cáscara de kiwi	T°: 75 °C	17,30	(Karbus & Tugrul, 2021)
		Cáscara de limón	θ: 3 min pH: 2	10,11	
	Cáscara de mandarina		11,29		
	Cáscara de kiwi	Potencia: 360 W θ: 3 min pH: 2	17,97		
MAE	Cáscara de limón		9,71		
	Cáscara de mandarina		7,60		
12	MAE	Residuos de pulpa de café	Potencia: 900 W θ: 15 min pH: 3	9,3	(Chamyuang et al., 2021)
13	UAE	Cáscara de naranja	Potencia: 155,6 W θ: 23 min pH: 1,52	27,80	(Hundie, 2021)
14	UAE	Cáscara de naranja	Potencia: 100 W θ: 30 min pH: 1,5	19,30	(Zioga, et al., 2022)
15	MAE	Cáscara de pitahaya	Potencia: 100 W θ: 15 min	17,61	(Nguyen et al., 2022)
16	MAE	Cáscaras mixtas de plátano y papaya	T°: 73 °C θ: 35 min pH: 2	23,78	(Mada et al., 2022)
17	MAE	Cáscara de naranja entera	Potencia: 620 W θ: 3 min	22,8	(Zioga et al., 2022)
		Albedos de naranja	T°: 90 °C pH: 1,5	19,3	
18	MAE	Cáscara de plátano	Potencia: 420 - 613 W θ: 5- 10 min	15,23	(Quoc, 2022)
19	UAE	Cáscara de yaca	T°: 60 °C pH: 2,5	11,67	(Sook et al., 2023)
20	MAE	Cáscara de yaca	T°: 65,9 °C θ:10,56 min pH: 1,5	29,87	(Tran et al., 2023)
21	UAE	Piel de cebolla	Potencia: 150 W T°: 90 °C θ: 15 min	9,83	(Şen et al., 2024)
22	MAE	Cáscara de Jabuticaba	Potencia: 500 W θ: 15 min pH: 1,8	22,06	(Resende & Franca, 2023)
23	UAE	Cáscara de granada	Potencia: 172 W T°: 69 °C θ: 29 min pH: 1,5	11,56	(Firat et al., 2023)
24	MAE	Cáscara de sandía	Potencia: 596 W θ: 6 min pH: 1,3	9,40	(Firat et al., 2023)
25	UAE	Cáscara de naranja	Potencia: 130 W θ: 5 min pH: 2,3	21,78	(Castellarin et al., 2023)
26	UAE	Cáscara de <i>Citrus limetta</i>	Potencia: 500 W T°: 40 °C θ: 24 min pH: 1,9	28,73	(Panwar et al., 2023)

27	UAE	Cáscara de Jackfruit	Potencia: 750 W T°: < 40 °C	12,63	(Saurabh et al., 2023)
28	MAE	Cáscara de Citrus limetta	Potencia: 600 W pH 1 θ: 180 s	32,75	(Sharma et al., 2023)
29	MAE	Cáscara de <i>Aframomum angustifolium</i>	Potencia: 555,18 W θ: 40,69 min pH: 2,79	4,74	(Mbaku et al., 2023)
30	MAE	Cáscara de piña	Potencia: 600 W pH: 1,52	2,43	(Zakaria et al., 2023)
31	UAE	Cáscara de cítricos (Buzhihuo)	Potencia: 100 W pH: 2 θ: 5,5 min T°: >30 °C	18,4	(Li et al., 2024)
32	UAE	Cáscara de limón	T 55 °C θ: 60 min pH: 1	37,9	(Pei et al., 2024)
	MAE		Potencia: 450 W θ: 4 min pH: 1	42	
33	UAE	Cáscara de mandarina Ponkan	T°: 81,9 °C pH: 5,3 SLR: 1:33,9	11,62	(Vieira et al., 2024)
34	UAE	Cáscara de pomelo	Potencia: 44,01 W θ: 9,38 min	26,35	(Vathsala et al., 2024).
		Cáscara de lima	SLR: 1:46,8	23,8	
35	MAE	Cáscara de naranja	Potencia: 360 W θ: 15 min T°: 50 °C	40	(Turan et al., 2024)
36	MAE	Cáscara de ajo	Potencia: 600 W θ: 4 min pH: 1.23 -1.45	24,62	(Şen et al., 2024)
37	MAE	Cáscara de mandarina kinnow	T°: 110 °C pH: 2,2 θ: 10 min	9,81	(Duggal et al., 2024)
38	MAE	Cáscara de mandarina	Potencia: 1500 W T°: 109 °C pH: 1,7 θ: 12 min	30,4	(Benmebarek et al., 2024)
39	UAE	Cáscara de <i>Citrus maxima</i>	Potencia: 100 W T°: 70 °C pH: 2 θ: 30 min	21,13	(Hossain et al., 2024)
	MAE		Potencia: 600 W T°: 40 °C pH: 2 θ: 9 min	26,63	
40	MAE	Cáscara de sandía Cáscara de sandía	Potencia: 900 W pH: 2,01 θ: 6.34 min	17,41	(Shourove et al., 2025)
	UAE		pH: 2,01 θ: 54,23 min	5,08	
	UMAE		Potencia: 900 W pH: 2,01 θ: 6,34 min θ Sonificación: 54,23 min	32,11	
41	Hidrotermal+ MAE	Pulpa de zanahoria negra	Potencia: 79 W θ: 6,43 min SLR: 1:15	26,29	(Elik & Armağan, 2025)
42	MAE	Cáscara de limón	Potencia: 900 W pH: 1 θ: 80 s	47,3	(Wani & Patidar, 2025)
43	UAE	Cáscara de lima dulce	Potencia: 900 W θ: 34.55 min SLR: 1:30:1 Amplitud: 60%	37,21	(Rai et al., 2025)

Nota. UAE: Extracción asistida por ultrasonidos, MAE: extracción asistida por microondas, SCF: extracción asistida por fluido supercrítico, UMAE: extracción asistida por ultrasonido-microondas, θ: extracción, SLR: relación sólido- líquido (g/mL) y T°: temperatura de extracción.

Durante el período comprendido entre 2020 y 2025, se publicaron un total de 43 artículos científicos relacionados con la extracción de pectina, según los datos recopilados de las bases de datos Scopus y ScienceDirect. Como se muestra en la Figura 2, en 2020 se publicaron 8 artículos; sin

embargo, en 2021 y 2022 se produjo una disminución de la producción científica. Por el contrario, 2023 y 2024 marcaron un repunte significativo, con 11 y 10 artículos publicados, respectivamente, y hasta abril de 2025 se han registrado cuatro publicaciones adicionales,

demonstrando el interés sostenido por parte de la comunidad científica. Esta tendencia al alza refleja un enfoque en la valorización de los residuos agroindustriales mediante técnicas de extracción sostenibles desde el punto de vista medioambiental, en consonancia con los principios de la economía circular y la sostenibilidad medioambiental.

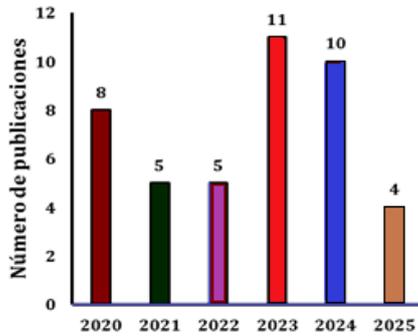


Figura 2. Producción científica por año.

Por otra parte, el análisis de las tecnologías emergentes evidencia que la mayoría de los estudios incluidos se enfocaron en MAE y UAE, confirmando su consolidación como métodos predominantes en la extracción de pectina (Figura 3).

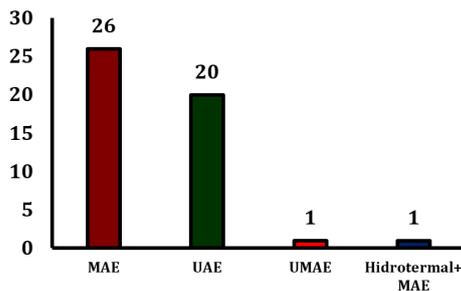


Figura 3. Frecuencia de uso de tecnologías emergentes en los estudios incluidos sobre extracción de pectina.

En contraste, la extracción hidrotermal asistida por microondas y la extracción asistida por ultrasonido-microondas (UMAE) fueron reportadas en un número mínimo de investigaciones. No obstante, su mención resulta pertinente dado que estudios recientes (2025) han comenzado a

explorar estas técnicas, orientándolas hacia la integración de procesos que buscan optimizar el rendimiento, la calidad y las propiedades funcionales de la pectina (Shourove et al., 2025). La Figura 4 muestra la frecuencia con la que distintos residuos agroindustriales han sido objeto de investigación para la extracción de pectina. Las cascara de los cítricos (naranja, mandarina, limón y lima) representan más de la mitad de las investigaciones (52%), confirmando su rol como principales fuentes. Los resultados de la Figura 4 se alinean con la producción comercial de pectina, donde las cáscaras y orujos de cítricos representan el 85,5% de la fabricación global, seguidos por la pulpa de manzana con el 14% (Mamiru & Gonfa, 2023). La importancia de los cítricos como fuente de pectina radica en que sus cáscaras constituyen entre el 30% - 65% del peso total del fruto, dependiendo de la variedad (Hossain et al., 2024).

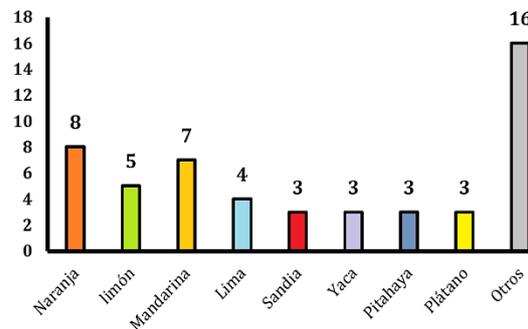


Figura 4. Residuos agroindustriales que han prestado mayor atención para la extracción de pectina

Figura 5 muestra que el rendimiento promedio de extracción de pectina varía según el residuo y la técnica empleada. En general, MAE supera a UAE, alcanzando valores máximos en lima (32,8%) y limón (31,1%). La sandía, pese a presentar bajos valores con UAE (19,7%) y MAE (9,4%), obtuvo el mayor rendimiento mediante UMAE (32,1%), evidenciando el efecto sinérgico de la técnica combinada. En contraste, residuos como mandarina y plátano registraron bajos rendimientos. Estos resultados resaltan que la eficiencia depende del tipo de residuo y del método, destacando la ventaja del UMAE frente a métodos individuales.

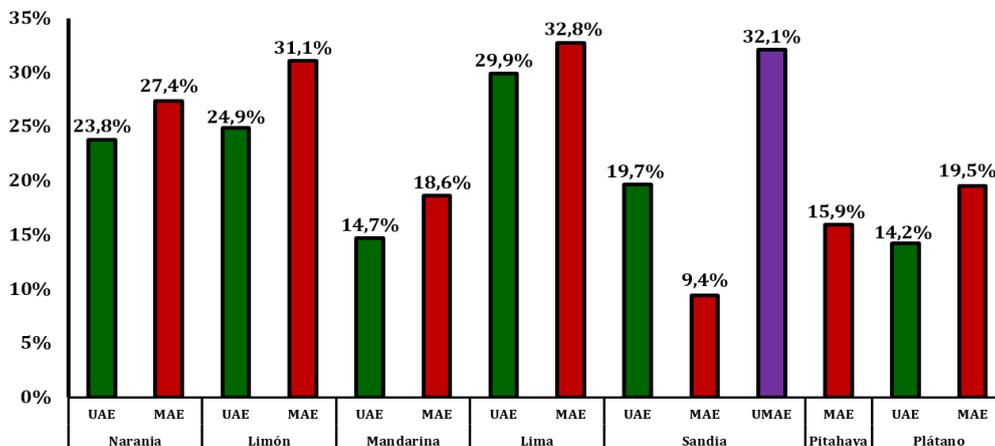


Figura 5. Rendimiento promedio de extracción de pectina de los residuos agroindustriales mediante MAE, UAE y UMAE. Se presentan únicamente los residuos con mayor frecuencia de estudio en la literatura analizada.

Extracción de pectina a partir de residuos agroindustriales mediante microondas y ultrasonido

Como se muestra en la Figura 6, la extracción de pectina mediante tecnologías emergentes inicia con el acondicionamiento del material, que incluye la obtención del residuo, su secado y la reducción de su tamaño mediante molienda (Panwar et al., 2023). Para la extracción, se pesan 5 g del polvo de cáscara molida, se añade agua destilada como disolvente y se ajusta el pH entre 1,3 y 3 utilizando ácido cítrico u otro agente acidulante. La mezcla se somete a extracción utilizando tecnologías como MAE o EAU, en las que se controlan diferentes variables (Hossain et al., 2024). Posteriormente, la pectina se recupera por filtración, precipita con etanol, filtra de nuevo y se somete a secado y molienda (Du et al., 2024). Por último, la pectina obtenida se evalúa mediante análisis fisicoquímicos y funcionales y la determinación del rendimiento de la extracción (Benmebarek et al., 2024).

Influencia de las variables de extracción en el rendimiento de la pectina mediante MAE y UAE

El rendimiento de pectina varía en función de la técnica de extracción, el tipo de material vegetal utilizado y los diferentes parámetros, como la temperatura, tiempo, pH, tipo de disolventes (agua caliente, ácidos minerales u orgánicos) y la relación líquido-sólido.

Un estudio realizado por Zioga, et al. (2022) extrajeron pectina de residuos de naranja entera y albedos de naranja mediante MAE en condiciones de 1,5 pH (con HCl), SLR 1:25 p/v, 620 W de potencia y un tiempo de irradiación de microondas 3 min. Bajo es condiciones se obtuvieron rendimientos del 22,8 y 19,3 para cáscara y albedos naranja, respectivamente. Los investigadores concluyeron que las condiciones de extracción y el tipo de materia prima afectaron las propiedades (grado de esterificación (DE) y contenido ácido galacturónico (GalA)) y el rendimiento de la

pectina. Por su parte, Turan et al. (2024) que obtuvieron un rendimiento del 40%, con unas condiciones de proceso de 360 W por 15 min. Esto permite inferir que cuando se utiliza menos potencia y más tiempo, se evita la degradación de la pectina, obteniéndose así un mayor rendimiento.

Otro estudio realizado por Karbuz & Tugrul (2021) informaron un rendimiento del 10,11% para la pectina de cáscara de limón extraída a 75 °C, 360 W de potencia, 3 min de irradiación y un pH de 2,0 utilizando MAE; por el contrario, Pei et al. (2024), extrajeron pectina de cáscara de limón, estudiando variables como tiempo de extracción (1,5 - 6,5 min), pH (pH 1,0 - 3,0) y potencia (150 - 650 W). En condiciones de extracción de 4 min, pH 1,0 y 450 W, se logró el máximo rendimiento (42%) con DE superior al 80% y un contenido de GalA del 68,7%. Asimismo, los gráficos de superficie de respuesta indicaron que incrementar el tiempo, disminuir el pH y aumentar la potencia condujo a un aumento concomitante en el rendimiento de pectina. No obstante, estos valores deben ser controlados adecuadamente, ya que, al utilizar un tiempo de extracción de 5,5 min, un pH de 1,4 y una potencia de 650 W, el rendimiento redujo hasta 37,2%.

Por otro lado, el pH es un factor determinante en el proceso de extracción, ya que influye significativamente en el rendimiento. Thu et al. (2021) aplicaron el método de MAE para extraer pectina de cáscara de pitahaya roja y blanca. Bajo las mismas condiciones de extracción de 150 W de potencia, SRL de 1:50 durante 10 min y variando solo el pH (3 y 4), se obtuvo que, cuando se extrajo con pH 3, los rendimientos fueron 17,79% y 15% para la pitahaya roja y blanca, respectivamente, mientras que estos disminuyeron significativamente al utilizar un pH 4, reportándose un rendimiento de 4,92% para la variedad roja y 5,11% para la blanca. Según este estudio, se observa que en condiciones de pH más bajo se extrae una mayor cantidad de pectina de la matriz vegetal.



Figura 6. Diagrama general de la extracción de pectina a partir de residuos agroalimentarios utilizando tecnologías emergentes.

Con respecto a la extracción asistida por ultrasonido, Rai et al. (2025) señalaron que, durante la UAE, cuando se incrementó la amplitud del 45% al 60%, el rendimiento subió hasta el 27,65 % y el 34,12 %, respectivamente. Sin embargo, una amplitud elevada (90%) causó una disminución del rendimiento (29,71%). La caída en el rendimiento de pectina se puede deber a que la ultrasonificación es cada vez más intensa, lo que origina la ruptura de la cadena polimérica y la descomposición del exoesqueleto de pectina por implosión asimétrica de las burbujas y por la creación de microchorros. Por su parte, Panwar et al. (2023) optimizaron mediante el diseño Box-Behnken la extracción de pectina de cáscaras de *Citrus limetta*, logrando un rendimiento máximo del 28,73 % bajo condiciones ideales de 40 °C de temperatura, 37 % de amplitud, 1,9 pH y 24 min de sonicación. Además, señalaron que el empleo de una amplitud ultrasónica alta reduce la efectividad de cavitación por causa del colapso turbulento asimétrico de las burbujas; esto reduce la transmisión de energía y, por ende, el rendimiento. Según estos estudios, para optimizar la eficacia de extracción de pectina, se deben emplear amplitudes por debajo del 60%.

Comparación en la MAE y UAE en la extracción de pectina

Las tecnologías emergentes como la MAE y la UAE ofrecen grandes ventajas para la extracción de pectina. Sin embargo, la selección del método adecuado depende del tipo de residuo agroindustrial utilizado, ya que el contenido de pectina varía mucho entre los diferentes residuos de frutas y verduras debido a las diferencias en su composición y estructura celular. Según un estudio realizado por Mada et al. (2022), aplicando MAE a las cáscaras mixtas de plátano y papaya, tuvo un rendimiento máximo del 23,78 %. Por el contrario, Rivadeneira et al. (2020) extrajeron pectina utilizando UAE a partir de cáscara de plátano, obteniendo un rendimiento máximo del 14,2 %. De manera similar, Hossain et al. (2024) compararon ambas tecnologías (MAE y UAE) para extraer pectina de cáscara de *Citrus maxima*. Los resultados evidenciaron que el mayor rendimiento (26,63%) se logró utilizando MAE, mientras que con UAE el rendimiento fue del 21,13%. Del mismo modo, Pei et al. (2024) obtuvieron rendimiento del 42 y 37,9% con MAE y UAE, respectivamente. Esta congruencia también ha sido evidenciada en la Figura 5, donde los rendimientos promedios fueron mayores cuando se utilizó MAE en lugar de UAE. El mayor rendimiento de MAE frente a UAE en la extracción de pectina se fundamenta en el mecanismo de acción de las microondas: estas generan un calentamiento volumétrico rápido y uniforme, que rompen las paredes celulares, incrementa la permeabilidad y facilita la solubilización de la pectina. En cambio, la UAE actúa principalmente por cavitación acústica, un proceso menos eficiente para despolimerizar y liberar polisacáridos de la matriz vegetal. Por ello, MAE favorece una mayor transferencia de masa y tiempos de extracción más cortos, traduciéndose en rendimientos superiores.

Si bien la MAE y la UAE ofrecen rendimientos superiores en comparación con la extracción convencional, su eficiencia puede maximizarse significativamente mediante la aplicación sinérgica de ambas tecnologías. Esta sinergia se puede lograr tanto de forma secuencial (utilizando una como pretratamiento para la otra) como simultánea. Shourove et al. (2025) extrajeron pectina de cáscaras de sandía mediante MAE, UAE y UMAE (extracción secuencial de ultrasonido-microondas). Los rendimientos fueron 32,11, 17,41 y 5,68% utilizando UMAE (potencia de 900 W, 2,01 pH, un tiempo de irradiación de 6,34 min y tiempo de sonificación de 32 min), MAE y UAE, respectivamente. Asimismo, el rendimiento obtenido mediante UMAE fue significativamente superior a los reportados por Firat et al. (2023) y Lim et al. (2020), quienes obtuvieron rendimientos de 9,40 % y 19,67 %, respectivamente, mediante MAE y UAE en el mismo residuo agroindustrial. Los investigadores indicaron que, en la UMAE, la muestra pretratada con ultrasonido interactúa de manera más efectiva con el solvente debido a las microfracturas generadas en la pared celular del material vegetal, mientras que el tratamiento con microondas aumenta aún más la solubilidad de la pectina al elevar la temperatura, acelerando su extracción. Asimismo, los autores indicaron que La UMAE, además, tuvo la menor emisión de CO₂ (0,041 kg/g) y el consumo energético más bajo (0,052 kWh/g de pectina seca) en comparación con la MAE y la UAE.

El incremento en el rendimiento es más notable cuando la UAE y la MAE se emplean de manera secuencial; sin embargo, este puede optimizarse aún más cuando ambas técnicas se aplican de forma simultánea. En un estudio reciente, Malpartida et al. (2025) extrajeron pectina de alta pureza de cáscara de naranja mediante extracción asistida por ultrasonido y microondas de forma simultánea. En condiciones óptimas de UMAE (60 °C y 500 W con 50% de amplitud y 3 min de duración), el proceso de extracción de pectina alcanzó un rendimiento máximo del 65,40%, esto fue mayor MAE y UAE con rendimiento del 26,63 y 38,45%, respectivamente. ; esto fue mayor que la MAE y UAE con rendimientos del 26,63 y 38,45%, respectivamente. Con el método innovador (UMAE de forma simultánea) no solo lograron un alto rendimiento, sino también una pectina de alta calidad, presentando un 70,2% de grado de esterificación y un contenido de GalA del 81,56%. Los autores indicaron que la UMAE es una tecnología con gran potencial para el aprovechamiento de residuos agroindustriales en la producción de pectina, en menos tiempo, de forma más ecológica y con mayor rendimiento y mejor calidad de pectina.

Identificación y análisis de las palabras más utilizadas en los títulos y resúmenes de los artículos incluidos

Para identificar las palabras más frecuentes, se utilizó la aplicación VOSviewer, que, a través de la red de coocurrencia, permite identificar las

palabras más repetidas en los títulos de los 43 artículos, representándolas como nodos o puntos. Los nodos más grandes indican una mayor frecuencia de aparición de las palabras y las conexiones entre los nodos reflejan la fuerza de la relación entre las palabras, y cuanto más gruesa es la línea, más fuerte es la vinculación de la palabra en los títulos de los artículos.

En este análisis, se destacan dos clústeres importantes (rojo y verde) (Figura 7). Clúster rojo (Extracción y Metodología): Este clúster se centra en la tecnología de extracción. Sus nodos clave son "microwave-assisted extraction", "microwaves", "extraction" y "response surface methodology". Esto indica una fuerte tendencia en la investigación hacia la aplicación y optimización de métodos avanzados para la extracción de pectina, particularmente la extracción asistida por microondas (MAE), utilizando diseño robusto como la metodología de superficie de respuesta para maximizar el rendimiento y la eficiencia de extracción.

Clúster Verde (Pectina y Caracterización): Este clúster se enfoca en el producto final y sus propiedades. Sus nodos centrales son "pectins", "pectin extraction" y "characterization". Esto sugiere que la investigación se dirige no solo a obtener la pectina, sino también a estudiar y comprender sus características intrínsecas (como grado de esterificación, contenido de GalA y propiedades funcionales y emulsificantes entre otras), las cuales son cruciales para su funcionalidad y aplicación de la pectina en diversas industrias.

Ambos clústeres convergen en la extracción de pectina como eje común. Las tendencias sugieren un avance hacia tecnologías asistidas y modelos de optimización, mientras que los vacíos científicos se relacionan con la escasa integración de las tecnologías emergentes, caracterización y optimización de las mismas, así como con la limitada diversificación hacia matrices no cítricas para la extracción de pectina.

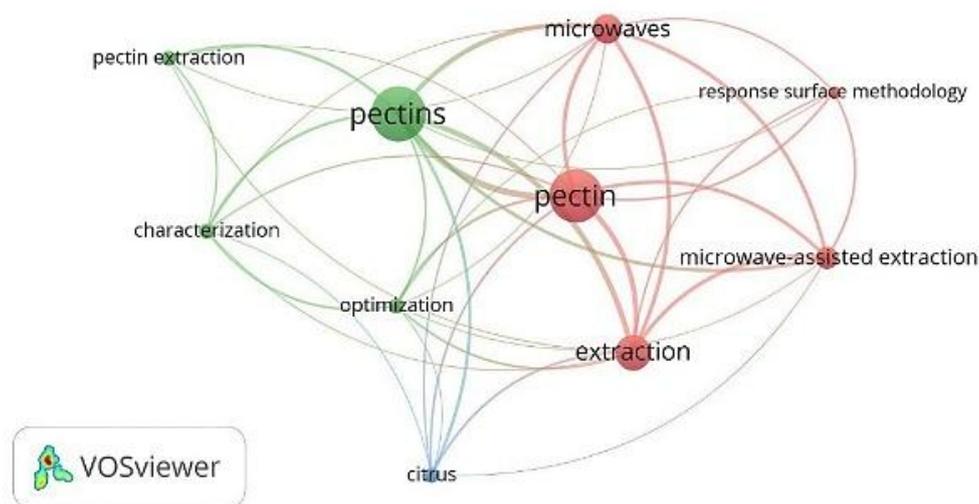


Figura 7. Identificación en la red de coocurrencia de las palabras más relevantes.

CONCLUSIONS

La extracción de pectina a partir de residuos agroindustriales mediante métodos emergentes, como la extracción asistida por microondas, ultrasonido, ofrece ventajas significativas, tales como mayores rendimientos, tiempos de extracción reducidos y menor impacto medioambiental en comparación con los métodos convencionales. Por otro lado, para la extracción es importante ajustar las variables del proceso (potencia, tiempo, temperatura y pH) y también seleccionar el tipo de

residuos que se van a utilizar, ya que estos pueden variar en su contenido de pectina. Basándose en los estudios analizados, se recomienda que las investigaciones futuras evalúen la combinación sinérgica de estas tecnologías y determinen cómo influyen en el rendimiento y las características fisicoquímicas de la pectina. Además, se sugiere evaluar la aplicabilidad de la pectina en matrices alimentarias como los productos lácteos y la sustitución parcial de grasas en la industria cárnica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arrutia, F., Adam, M., Calvo-Carrascal, M. Á., Mao, Y., & Binner, E. (2020). Development of a continuous-flow system for microwave-assisted extraction of pectin-derived oligosaccharides from food waste. *Chemical Engineering Journal*, 395. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125056>

Asgari, K., Labbafi, M., Khodaiyan, F., Kazemi, M., & Hosseini, S. S. (2020). High-methylated pectin from walnut processing wastes as

a potential resource: Ultrasound assisted extraction and physicochemical, structural and functional analysis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 152, 1274–1282. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.224>

Benmebarek, I. E., Gonzalez-Serrano, D. J., Aghababaei, F., Ziogkas, D., Garcia-Cruz, R., Boukhari, A., Moreno, A., & Hadidi, M. (2024). Optimizing the microwave-assisted hydrothermal extraction of

- pectin from tangerine by-product and its physicochemical, structural, and functional properties. *Food Chemistry*, *X*, 23, 101615. <https://doi.org/10.1016/j.FOCHX.2024.101615>
- Castellarin, I., Higuera Coelho, R., Zukowski, E., Ponce, N. M. A., Stortz, C., Gerschenson, L. N., & Fissore, E. N. (2023). Effect of ultrasonic pretreatments on the characteristics of pectin extracted from Salustiana orange cultivated in Argentina. *Journal of Food Process Engineering*, *46*(6), e14229. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14229>
- Chamyuang, S., Owatworakit, A., Intatha, U., & Duangphet, S. (2021). Coffee pectin production: An alternative way for agricultural waste management in coffee farms. *ScienceAsia*, *47*(S1), 90–95. <https://doi.org/10.2306/SCIENCEASIA1513-1874.2021.S003>
- Choudhury, N., Nickhil, C., & Deka, S. C. (2025). Optimization and characterization of physicochemical, morphological, structural, thermal, and rheological properties of microwave-assisted extracted pectin from *Dillenia indica* fruit. *International Journal of Biological Macromolecules*, *295*, 139583. <https://doi.org/10.1016/j.IJBIOMAC.2025.139583>
- de Souza, V., Negreiros, L., Ribeiro, B., Paiva Lopes, J., & das Chagas, F. (2025). Physicochemical characterization, pectin extraction and analysis of volatile compounds of *Alibertia sorbilis* Ducke using ultrasound: Potential for new products in the bioeconomy of the Amazon. *Food and Humanity*, *4*, 100529. <https://doi.org/10.1016/j.FOOHUM.2025.100529>
- Divyashri, G., Krishna Murthy, T. P., Ragavan, K. V., Sumukh, G. M., Sudha, L. S., Nishka, S., Himanshi, G., Misriya, N., Sharada, B., & Anjanapura Venkataramanaiah, R. (2023). Valorization of coffee bean processing waste for the sustainable extraction of biologically active pectin. *Heliyon*, *9*(9), e20212. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20212>
- Dixit, S. S., Muruganandam, L., & Ganesh Moorthy, I. (2025). Pectin from fruit peel: A comprehensive review on various extraction approaches and their potential applications in pharmaceutical and food industries. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, *9*, 100708. <https://doi.org/10.1016/j.CARPTA.2025.100708>
- Du, H., Olawuyi, I. F., Said, N. S., & Lee, W. Y. (2024). Comparative Analysis of Physicochemical and Functional Properties of Pectin from Extracted Dragon Fruit Waste by Different Techniques. *Polymers* *2024*, Vol. *16*, Page *1097*, 16(8), 1097. <https://doi.org/10.3390/POLYM16081097>
- Duggal, M., Singh, D. P., Singh, S., Khubber, S., Garg, M., & Krishania, M. (2024). Microwave-assisted acid extraction of high-methoxyl kinnow (*Citrus reticulata*) peels pectin: Process, techno-functionality, characterization and life cycle assessment. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, *9*, 100213. <https://doi.org/10.1016/j.FOCHMS.2024.100213>
- Durga, A., Deepa, R., Prakash, Pandurangan, Swetha, S., Stanley, A., Antony, S., Ravi, S., Thirumurugan, A., & Meivelu, M. (2025). Sustainable pectin extraction: Navigating industrial challenges and opportunities with fruit by-products – A review. *Process Biochemistry*, *154*, 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.PROCBIO.2025.04.025>
- Elik, A., & Armağan, H. S. (2025). Valorization of black carrot pomace by using microwave-assisted hydrothermal extraction method: An optimization and comparison research on pectin extraction. *Food and Humanity*, *4*, 100637. <https://doi.org/10.1016/j.FOOHUM.2025.100637>
- Fernández-Delgado, M., del Amo-Mateos, E., Coca, M., López-Linares, J. C., García-Cubero, M. T., & Lucas, S. (2023). Enhancement of industrial pectin production from sugar beet pulp by the integration of surfactants in ultrasound-assisted extraction followed by diafiltration/ultrafiltration. *Industrial Crops and Products*, *194*, 116304. <https://doi.org/10.1016/j.IJNCROP.2023.116304>
- Fiedot, M., Rac-Rumijowska, O., Suchorska-Woźniak, P., Czajkowski, M., Szustakiewicz, K., Safandowska, M., Róžański, A., Zdunek, A., Stawiński, W., Cybińska, J., Teterycz, H., & Kennedy, J. F. (2024). The smart apple-based foil: The role of pectin-glycerol-lipid interactions on thermoresponsive mechanism. *Food Hydrocolloids*, *154*, 110067. <https://doi.org/10.1016/j.FOODHYD.2024.110067>
- Firat, E., Koca, N., & Kaymak-Ertekin, F. (2023). Extraction of pectin from watermelon and pomegranate peels with different methods and its application in ice cream as an emulsifier. *Journal of Food Science*, *88*(11), 4353–4374. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16752>
- Haque, S. M., Kabir, A., Ratemi, E., Elzagheid, M., Appu, S. P., Ghani, S. S., & Sarief, A. (2025). Greener Pectin Extraction Techniques: Applications and Challenges. *Separations*, *12*(3), 65. <https://doi.org/10.3390/SEPARATIONS12030065>
- Hernandez, O., Ferreira, A., Tiwari, B., & Villamiel, M. (2024). Update of high-intensity ultrasound applications for the extraction of pectin from agri-food by-products. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *175*, 117728. <https://doi.org/10.1016/j.TRAC.2024.117728>
- Hernandez-Hernandez, O., Ferreira-Lazarte, A., Tiwari, B., & Villamiel, M. (2024). Update of high-intensity ultrasound applications for the extraction of pectin from agri-food by-products. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *117728*. <https://doi.org/10.1016/j.TRAC.2024.117728>
- Hossain, M. M., Ara, R., Yasmin, F., Suchi, M., & Zzaman, W. (2024). Microwave and ultrasound assisted extraction techniques with citric acid of pectin from Pomelo (*Citrus maxima*) peel. *Measurement: Food*, *13*, 100135. <https://doi.org/10.1016/j.MEAF00.2024.100135>
- Hundie, K. B. (2021). Optimization and characterization of ultrasound-assisted pectin extracted from orange waste. *Pakistan Journal of Analytical and Environmental Chemistry*, *22*(2), 344–357. <https://doi.org/10.21743/pjaec/2021.12.13>
- Iñiguez-Moreno, M., Pizaña-Aranda, J. J. P., Ramírez-Gamboa, D., Ramírez-Herrera, C. A., Araujo, R. G., Flores-Contreras, E. A., Iqbal, H. M. N., Parra-Saldivar, R., & Melchor-Martinez, E. M. (2024). Enhancing pectin extraction from orange peel through citric acid-assisted optimization based on a dual response. *International Journal of Biological Macromolecules*, *263*, 130230. <https://doi.org/10.1016/j.IJBIOMAC.2024.130230>
- Karbus, 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>
- 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 and Emerging Technologies*, *74*, 102844. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102844>
- Li, H., Li, Z., Wang, P., Liu, Z., An, L., Zhang, X., Xie, Z., Wang, Y., Li, X., & Gao, W. (2024). Evaluation of citrus pectin extraction methods: Synergistic enhancement of pectin's antioxidant capacity and gel properties through combined use of organic acids, ultrasonication, and microwaves. *International Journal of Biological Macromolecules*, *266*, 131164. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131164>
- Lim, W. Y. C., Yusof, N. L., Ismail-Fitry, M. R., & Suleiman, N. (2020). Valorization of valuable compound from watermelon by-product using ultrasound-assisted extraction. *Food Research*, *4*(6), 1995–2002. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(6\).197](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(6).197)
- Mada, T., Duraisamy, R., & Guesh, F. (2022). Optimization and characterization of pectin extracted from banana and papaya mixed peels using response surface methodology. *Food Science and Nutrition*, *10*(4), 1222–1238. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2754>
- Malpartida, R., Ore, F., De La Cruz, G., Yata, L. E., Tocto, L., Fierro, Y. E. C., Cochachi, W., & Ruiz, A. (2025). Optimized Extraction of High-purity Pectin from Orange Biowaste using Synergistic Ultrasound-microwave-assisted Green Technologies. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, *13*(2), 764–781. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.13.2.15>
- Mamiru, D., & Gonfa, G. (2023). Extraction and characterization of pectin from watermelon rind using acetic acid. *Heliyon*, *9*(2), e13525. <https://doi.org/10.1016/j.HELIYON.2023.E13525>
- Maqbool, Z., Khalid, W., Atiq, H. T., Koraqi, H., Javaid, Z., Alhag, S. K., Al-Shuraym, L. A., Bader, D. M. D., Almarzuq, M., Afifi, M., & AL-Farga, A. (2023). Citrus Waste as Source of Bioactive Compounds: Extraction and Utilization in Health and Food Industry. *Molecules* *2023*, Vol. *28*, Page *1636*, 28(4), 1636. <https://doi.org/10.3390/molecules28041636>
- Mbaku, A. B., Ngwasiri, P. N., Ambindei, W. A., Ngwabie, N. M., & Ngassoum, M. B. (2023). Agrofood Waste and By-Product Valorization, Extraction, and Characterization of Pectin from the Waste Biomass Fruit Peel of *Aframomum angustifolium* Using Response Surface Methodology as Alternative Sources of a Functional Pectin. *International Journal of Chemical Engineering*, *2023*, 5277914. <https://doi.org/10.1155/2023/5277914>
- Muñoz-Almagro, N., Molina-Tijeras, J. A., Montilla, A., Vezza, T., Sánchez-Milla, M., Rico-Rodríguez, F., & Villamiel, M. (2023). Pectin from sunflower by-products obtained by ultrasound: Chemical characterization and in vivo evaluation of properties in inflammatory bowel disease. *International Journal of Biological Macromolecules*, *246*, 125505. <https://doi.org/10.1016/j.IJBIOMAC.2023.125505>
- Nguyen, K. X., Mai, H. C., Tran, T. K. N., & Nguyen, T. V. (2022). Evaluation of parameters affecting the process of extraction pectin from red flesh dragon fruit peel. *3rd Symposium on Industrial Science and Technology 2021*, *51*, 1448–1454. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.165>
- Pangestu, R., Amanah, S., Juansilfero, A. B., & 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>
- Panwar, D., Panesar, P. S., & Chopra, H. K. (2023). Ultrasound-assisted extraction of pectin from Citrus limetta peels: Optimization, characterization, and its comparison with commercial pectin. *Food Bioscience*, 51, 102231. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102231>
- Pei, C. C., Hsien, T. S., Hsuan, F. C., Hsuan, H. L., Chi, C. C., & Yi, L. M. (2024). Microwave- and ultrasound-assisted extraction of pectin yield and physicochemical properties from lemon peel. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 101009. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101009>
- Quispe, A. M., Hinojosa-Ticona, Y., Miranda, H. A., & Sedano, C. A. (2021). Scientific writing series: Systematic review. In *Revista del Cuerpo Medico Hospital Nacional Almanzor Aguinaga Asenjo* (Vol. 14, Issue 1, pp. 94–99). Medical Body of the Almanzor Aguinaga Asenjo National Hospital. <https://doi.org/10.35434/rcmhnaaa.2021.141.906>
- Quoc, L. P. T. (2022). PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS AND ANTIOXIDANT ACTIVITIES OF BANANA PEELS PECTIN EXTRACTED WITH MICROWAVE-ASSISTED EXTRACTION. *Agriculture and Forestry*, 68(1), 145–157. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.68.1.08>
- Rahman, M. S., Khan, S. S., Ahmed, M. W., Jony, M. E., Das, P. C., & Uddin, M. B. (2023). Extraction of pectin from Elephant Apple and Pomelo fruit peels: Valorization of fruit waste towards circular economy. *Food Chemistry Advances*, 3, 100544. <https://doi.org/10.1016/j.FOCHA.2023.100544>
- Rahmani, Z., Khodaiyan, F., Kazemi, M., & Sharifan, A. (2020). Optimization of microwave-assisted extraction and structural characterization of pectin from sweet lemon peel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147, 1107–1115. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.079>
- Rai, P., Mishra, B., Jayakrishnan, U., Mukherjee, A., Moulik, S., Roy, S., & Kumari, A. (2025). Ultrasonic cavitation assisted deep eutectic solvent extraction of pectin from waste sweet lime peel: Statistical optimization and energetic analysis. *Industrial Crops and Products*, 228, 120895. <https://doi.org/10.1016/j.IJINDCROP.2025.120895>
- Resende, L. M., & Franca, A. S. (2023). Jabuticaba (*Plinia* sp.) Peel as a Source of Pectin: Characterization and Effect of Different Extraction Methods. *Foods*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/foods12010117>
- Rivadeneira, J. P., Wu, T., Ybanez, Q., Dorado, A. A., Migo, V. P., Nayve, F. R. P., & Castillo-Israel, A. T. (2020). Microwave-assisted extraction of pectin from "Saba" banana peel waste: Optimization, characterization, and rheology study. *International Journal of Food Science*, 2020, 8879425. <https://doi.org/10.1155/2020/8879425>
- Saurabh, V., Vathsala, V., Yadav, S. K., Sharma, N., Varghese, E., Saini, V., Singh, S. P., Dutta, A., & Kaur, C. (2023). Extraction and characterization of ultrasound assisted extraction: improved functional quality of pectin from jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) peel waste. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(6), 6503–6521. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-02126-w>
- Şen, E., Göktürk, E., & Uğuzdoğan, E. (2024). Microwave-assisted extraction of pectin from onion and garlic waste under organic, inorganic and dual acid mixtures. *Journal of Food Measurement and Characterization*. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02395-z>
- 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.jultsonch.2019.104812>
- Sharma, P., Osama, K., Varjani, S., Farooqui, A., & Younis, K. (2023). Microwave-assisted valorization and characterization of Citrus limetta peel waste into pectin as a perspective food additive. *Journal of Food Science and Technology*, 60(4), 1284–1293. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05672-9>
- Shourove, J. H., Jon, P. H., Samadder, M., Chy, M. W. R., Miah, M. S., Fahim, R. H., & Islam, G. M. R. (2025). Extraction of pectin from watermelon rinds using sequential ultrasound-microwave technique: Optimization using RSM and ANN modeling and characterization. *Inter J of Biological Macromolecules*, 307, 141905. <https://doi.org/10.1016/j.IJBIOMAC.2025.141905>
- Sook Wah, C., Ching Enn, H., Chin Ping, T., Yih Phing, K., & Zaixiang, L. (2023). Ultrasound-Assisted Extraction of Pectin from Jackfruit (*Artocarpus Heterophyllus*) Rags: Optimization, Characterization, and Application in Model Food Gel. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 11(3), 991–1007. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.11.3.07>
- 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>
- Thu Dao, T. A., Webb, H. K., & Malherbe, F. (2021). Optimization of pectin extraction from fruit peels by response surface method: Conventional versus microwave-assisted heating. *Food Hydrocolloids*, 113, 106475. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106475>
- Tran, N. T. K., Nguyen, V. B., Tran, T. V., & Nguyen, T. T. T. (2023). Microwave-assisted extraction of pectin from jackfruit rags: Optimization, physicochemical properties and antibacterial activities. *Food Chemistry*, 418. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135807>
- Turan, O., Isci, A., Yilmaz, M. S., Tolun, A., & Sakiyan, O. (2024). Microwave-assisted extraction of pectin from orange peel using deep eutectic solvents. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37, 101352. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101352>
- Vathsala, V., Singh, S. P., Bishnoi, M., Varghese, E., Saurabh, V., Khandelwal, A., & Kaur, C. (2024). Ultrasound-assisted extraction (UAE) and characterization of citrus peel pectin: Comparison between pummelo (*Citrus grandis* L. Osbeck) and sweet lime (*Citrus limetta* Risso). *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37, 101357. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101357>
- Vieira, D. R. R., da Silva, V. R., & Spier, M. R. (2024). Extraction of high methoxyl pectin from unripe waste Ponkan mandarin (*Citrus reticulata* Blanco cv. Ponkan) with an eco-friendly solvent. *International Journal of Biological Macromolecules*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128663>
- Wani, K. M., & Patidar, R. (2025). Microwave-assisted extraction of pectin from lemon peel powder: Optimization and physicochemical properties. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 9, 100223. <https://doi.org/10.1016/j.SCENV.2025.100223>
- Wani, K. M., & Uppaluri, R. V. S. (2023). Characterization of pectin extracted from pomelo peel using pulsed ultrasound assisted extraction and acidic hot water extraction process. *Applied Food Research*, 3(2), 100345. <https://doi.org/10.1016/j.AFRES.2023.100345>
- Yu, Y., Lu, P., Yang, Y., Ji, H., Zhou, H., Chen, S., Qiu, Y., & Chen, H. (2024). Differences in physicochemical properties of pectin extracted from pomelo peel with different extraction techniques. *Scientific Reports*, 14(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59760-7>
- Zakaria, N. A., Abd Rahman, N. H., Rahman, R. A., Zaidel, D. N. A., Hasham, R., Ilias, R. M., Mohamed, R., & Ahmad, R. A. (2023). Extraction optimization and physicochemical properties of high methoxyl pectin from Ananas comosus peel using microwave-assisted approach. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(4), 3354–3367. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-01858-z>
- Zioga, M., Chroni, A., & Evageliou, V. (2022). Utilisation of Pectins Extracted from Orange Peels by Non Conventional Methods in the Formation of Edible Films in the Presence of Herbal Infusions. *Polysaccharides*, 3(3), 574–588. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides3030034>
- Zioga, M., Tsouko, E., Maina, S., Koutinas, A., Mandala, I., & Evageliou, V. (2022). Physicochemical and rheological characteristics of pectin extracted from renewable orange peel employing conventional and green technologies. *Food Hydrocolloids*, 132, 107887. <https://doi.org/10.1016/j.FOODHYD.2022.107887>