



**Somos calidad,
somos USC**

Optimización del proceso de extracción de pectina de cáscaras de piña empleando técnicas emergentes: Revisión sistemática

Autor

Daniel Eduardo Garcia Idrobo

**Título por el que opta
Químico**

Director

PhD. Liseth Suarez Osorio

PhD. Ricardo Andrés Tusso Pinzón

**Grupo de Investigación
GIEMA**

**Línea de Investigación
Alimentos y fármacos**

**Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Química
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2025**

IMPACTOS

Relacione el (los) impacto(s) que presentó el Trabajo de Grado según los siguientes criterios:

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico	Generación de nuevo conocimiento	Productores de frutas, industria de alimentos, industria farmacéutica y cosmética
Responsabilidad social	Apropiación social del conocimiento	Empresas agroindustriales, sociedad, comunidades locales
Científico	Generación de nuevo conocimiento	Comunidad científica, estudiantes, centros de investigación y desarrollo (I+D)
Indicadores de Gestión	Generación de nuevo conocimiento	Gerentes de planta, ingenieros de proceso y calidad, departamentos de I+D industrial
Tecnológico	Generación de nuevo conocimiento	Desarrolladores de tecnología, fabricantes de equipos, empresas que busquen adoptar nuevas tecnologías
Técnico	Apropiación social del conocimiento	Personal técnico de laboratorio, ingenieros de planta y proceso, personal de I+D que implementa experimentos
Ambiental	Generación de nuevo conocimiento	Medio ambiente, entidades reguladoras, empresas con objetivos de sostenibilidad, gestores de residuos
Social	Apropiación social del conocimiento	Comunidad en general, consumidores, instituciones educativas
Cultural	No aplica	No aplica

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE PECTINA DE CÁSCARAS DE PIÑA EMPLEANDO TÉCNICAS EMERGENTES: REVISIÓN SISTEMÁTICA

Daniel Eduardo Garcia Idrobo¹ (daniel.garcia00@usc.edu.co)

¹Grupo de Investigación GIEMA, Programa de Química. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

El procesamiento industrial de alimentos genera subproductos que suelen ser desechados, lo cual resulta en impactos económicos y ambientales de gran magnitud. Su valorización es una estrategia eficiente para mitigar estos problemas, promover usos sostenibles y reincorporar compuestos bioactivos, tales como la pectina, presente en materiales vegetales, como las cáscaras de piña. Dicho biopolímero cuenta con diversas aplicaciones que tienen lugar en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética. Sin embargo, su demanda ha impulsado la adopción de técnicas de extracción emergentes, a causa de las limitaciones de los métodos convencionales en términos de eficiencia e impacto en la calidad. Estas técnicas ofrecen ventajas por su bajo consumo energético, mayor rendimiento, mejor calidad y generación mínima o nula de efluentes peligrosos. Esta revisión sistemática aborda el uso de la metodología de superficie de respuesta para recuperar pectina de cáscaras de piña, empleando técnicas emergentes como la extracción asistida por microondas y por ultrasonido, destacando su eficiencia, calidad, funcionalidad, así como las ventajas y desventajas de cada método. De modo que proporcionará una base sólida para futuras iniciativas de investigación y desarrollo, al exponer estrategias y parámetros de optimización reportados en la literatura científica.

Palabras clave: Cáscara de piña; extracción; metodología de superficie de respuesta; pectina; técnicas emergentes

OPTIMIZATION OF THE PECTIN EXTRACTION PROCESS FROM PINEAPPLE PEELS USING EMERGING TECHNIQUES: SYSTEMATIC REVIEW

ABSTRACT

Industrial food processing generates byproducts that are often discarded, resulting in significant economic and environmental impacts. Recycling is an efficient strategy to mitigate these problems, promote sustainable uses, and reincorporate bioactive compounds, such as pectin, present in plant materials like pineapple peels. This biopolymer has diverse applications in the food, pharmaceutical, and cosmetics industries. However, its demand has driven the adoption of emerging extraction techniques due to the limitations of conventional methods in terms of efficiency and impact on quality. These techniques offer advantages due to their low energy consumption, higher yield, improved quality, and minimal or no generation of hazardous effluents. This systematic review addresses the use of response surface methodology to recover pectin from pineapple peels, employing emerging techniques such as microwave and ultrasound-assisted extraction, highlighting their efficiency, quality, and functionality, as well as the advantages and disadvantages of each method. Thus, it will provide a solid foundation for future research and development initiatives by exposing strategies and optimization parameters reported in scientific literature.

Keywords: Emerging techniques; extraction; pectin; pineapple peel; response surface methodology

HIGHLIGHTS

- Los métodos empleados para la extracción de pectina de cáscaras de piña en los últimos años, además de la extracción convencional con ácido, involucran el uso de microondas y ultrasonido.
- La pectina extraída de la cáscara de piña se caracteriza principalmente como de alto metoxilo, con propiedades estructurales y funcionales con potencial aplicación en la industria alimentaria y farmacéutica al mostrar características mejoradas, comparables con la pectina comercial.
- La aplicación de la metodología de superficie de respuesta junto con diseños experimentales se revela como una herramienta útil para comprender y optimizar las complejas interacciones de las variables del proceso en la extracción asistida por microondas y ultrasonido, permitiendo alcanzar rendimientos superiores y pectina de alta calidad.

1. INTRODUCCIÓN

Globalmente, la piña (*Ananas comosus*) es una de las frutas tropicales más comercializadas en cuanto a volúmenes de exportación, pues solo en 2021, las exportaciones mundiales oscilaron entre los 3.2 millones de toneladas, posicionándola como un producto básico predominante en cantidad. Su producción se registra en más de 80 países alrededor del mundo, con un crecimiento significativo de 15.8 millones de toneladas en 2002 a 28.6 millones en 2021 (FAO, 2024), y se prevé que alcance los 32 millones de toneladas en 2032, como resultado de una expansión del 1.7% de la superficie cosechada. En 2022, Colombia demostró ser un actor relevante en este mercado, con Estados Unidos, Italia y Curazao como principales destinos de exportación, así como Ecuador y Costa Rica como mayores proveedores. Para el mismo periodo, los departamentos de Santander, Meta y Valle del Cauca se destacaron como los mejores productores a nivel nacional, con un área cosechada que osciló entre 2354-9403 ha (González Cerón, 2024). Según Shivamathi et al. (2022), cuando la piña se destina al consumo directo u obtención de productos derivados de su pulpa, se pierde cerca de 29-40% de la cáscara, 9-10% del corazón, 2-5% del tallo, y 2-4% de la corona. Estos residuos poseen un alto grado de productos biológicos comercializables, que podrían usarse en productos de valor agregado, como pectina, fibra dietética y enzimas.

La pectina es un biopolímero –heteropolisacárido– estructural complejo que se encuentra en las paredes celulares primarias y la lámina media de las plantas (Mbaku et al., 2023). Químicamente, está compuesta por unidades de ácido galacturónico (GalA) unidas covalentemente en posición α -1,4 (Pangestu et al., 2020). Puede ser de alto o bajo metoxilo según el límite entre estos estados, que se precisa como un 7% del contenido de metoxilo, equivalente a un 50% de esterificación con metanol, lo cual influye en sus propiedades fisicoquímicas y utilidad. Su pureza depende del contenido de GalA y del grado de esterificación, siendo de calidad estándar aquella que contiene GalA \geq 65% (Pei et al., 2024). Comercialmente se obtiene de cáscaras de cítricos y orujos de manzana, ya que ambos subproductos contienen entre 10-20% en base seca (Chua et al., 2020). Tiene múltiples usos industriales gracias a sus propiedades gelificantes, estabilizadoras, espesantes y emulsionantes (Sarah et al. 2022). En la industria de alimentos, actúa como aditivo –conocido con el código E440– y se suele añadir a mermeladas, jaleas, jugos de frutas y refrescos (Wani & Uppaluri), ya que puede reducir el tiempo de cocción, mejorar la textura, el color y aumentar la vida útil de los alimentos (Rivadeneira et al., 2020). En la industria farmacéutica, se emplea como portador de fármacos (i.e., nasal, ocular, oral), comprimidos y perlas de gel (Sarah et al., 2022), donde destaca por su capacidad para reducir los niveles de colesterol, glucosa sérica y el cáncer, además de estimular la respuesta inmune (Mada et al., 2023). En la industria del cuidado personal, se utiliza en la formulación de lociones y champús (Sindhu et al., 2024). A nivel mundial, su producción ha alcanzado cerca de 45,000 toneladas, con un crecimiento del 4-5% anual, representando oportunidades económicas para los productores y exportadores debido a la expansión de sus aplicaciones (Zakaria et al., 2023). Tal escenario está impulsando la exploración de fuentes alternativas y menos costosas, para su obtención (Saurabh et al., 2023).

Las cáscaras de piña cuentan con alto contenido de pectina en su composición, lo que las convierte en una fuente prometedora, en vista de que la industria se enfrenta a la presión de producir piña de manera más sostenible,

considerando el impacto ambiental y social de sus operaciones (FAO, 2024). Pese a esto, las técnicas convencionales para obtenerla presentan inconvenientes al incluir volúmenes altos de solvente, degradación y duración prolongada del proceso. La eficiencia del mismo puede variar considerablemente según el método utilizado, por lo cual el uso de técnicas emergentes (i.e., microondas, ultrasonido) funciona como alternativa, ya que son más competentes y sostenibles, en comparación (Shivamathi et al., 2022). Es importante tener en cuenta que las variables del proceso a menudo interactúan entre sí, y sus efectos combinados pueden influir en el resultado general de la extracción. Por ejemplo, Zakaria et al. (2023), encontraron una interacción significativa entre la potencia de microondas y el pH en el rendimiento de la pectina, lo cual implica que la potencia óptima varía según el pH utilizado. No obstante, realizar estudios sobre el efecto de cada una de las variables experimentales toma tiempo; para abordar esto, generalmente se emplea la metodología de superficie de respuesta, ya que permite evaluar el efecto de múltiples variables independientes y sus interacciones sobre una o más variables dependientes, buscando condiciones óptimas para maximizar o minimizar una respuesta (Sun et al., 2024).

Así pues, el objetivo de esta revisión sistemática fue analizar críticamente la literatura científica sobre la optimización del proceso de extracción de pectina de cáscaras de piña. Teniendo en cuenta las principales metodologías de extracción emergentes que han sido utilizadas, el análisis de las variables que afectan el rendimiento y la calidad, así como el uso de la metodología de superficie de respuesta en el proceso. La valorización de estos residuos no solo responde a una necesidad económica, sino que también aborda las preocupaciones ambientales y promueve la sostenibilidad, que son motivaciones clave para la exploración de dichas técnicas. De modo que esta revisión proporcionará una base sólida para futuras iniciativas de investigación y desarrollo, al exponer estrategias y parámetros de optimización reportados en la literatura científica.

2. METODOLOGÍA

Se realizó una revisión sistemática de la literatura científica publicada sobre la optimización del proceso de extracción de pectina utilizando técnicas emergentes (i.e., microondas, ultrasonido), con énfasis en las cáscaras de piña. Durante su elaboración se siguieron las directrices de la declaración PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) publicada por Page et al. (2022), para garantizar la transparencia y reproducibilidad del proceso. A continuación, se precisan a detalle sus distintas etapas:

2.1. Búsqueda inicial

Las búsquedas en las bases de datos ScienceDirect, Scopus, Springer y Taylor & Francis, iniciaron en febrero de 2025, partiendo de una combinación de los términos: 'characterization', 'emerging techniques', 'extraction', 'microwave', 'optimization', 'pectin', 'peel', 'pineapple', 'recovery', 'response surface methodology', 'rsm', 'ultrasound' y 'waste'. Mas adelante se adicionaron nuevos términos (i.e., 'emerging technologies', 'pectin extraction', 'pineapple peel') como complemento de la búsqueda y se aplicaron operadores booleanos (i.e., AND, OR) para refinar los resultados. Esto permitió reconocer el panorama en cuanto a la extracción de pectina de cáscaras de piña y de otras fuentes vegetales que utilizan técnicas emergentes como las microondas y el ultrasonido.

2.2. Búsqueda sistemática

La búsqueda sistemática en las bases de datos abarcó el periodo 2020-2024 y se limitó a los artículos de investigación publicados en inglés. Para las bases de datos ScienceDirect y Springer se obtuvieron 18 artículos utilizando la ecuación de búsqueda: ((pectin AND extraction) AND (response AND surface AND methodology) AND (emerging AND techniques) AND (pineapple AND peel) AND (microwave) AND (ultrasound)). Mientras que para Scopus y Taylor & Francis se obtuvieron 82 artículos a partir de la ecuación: ((pectin AND extraction) AND (response AND surface AND methodology) OR (emerging AND techniques) OR (pineapple AND peel) AND (microwave OR ultrasound)).

Posteriormente, se hizo uso del gestor bibliográfico Mendeley Reference Manager, para importar los registros (n = 100). No obstante, esto redujo automáticamente su número (n = 6), por una causa desconocida. Partiendo de este punto, se utilizó Rayyan para gestionar los registros durante el cribado y la selección de estudios. Su

plataforma centralizada facilitó la organización y análisis profundo de los estudios seleccionados, ya que sus funciones de etiquetado y notas contribuyeron a una evaluación sistemática y clara del riesgo de sesgo en la literatura, omitiendo de este modo algunos duplicados (n = 5). También se utilizó SCImago Journal & Country Rank como métrica para garantizar la calidad de las fuentes (Tabla 1). De manera que se priorizaron estudios de revistas Q1 y Q2, asegurando que las publicaciones proviniesen de fuentes con mayor prestigio y rigor editorial.

Tabla 1. Clasificación de revistas científicas según SCImago Journal & Country Rank.

Revista	Editor	H-Index	SJR	Cuartil
Foods	Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)	123	1.021	Q1
Molecules		261	0.865	
Food Chemistry: X	Elsevier Ltd	45	1.489	
Food Hydrocolloids	Elsevier B.V.	235	2.837	
Journal of Agriculture and Food Research		45	0.996	
Sustainable Chemistry and Pharmacy		59	0.966	
Food Science & Nutrition		74	0.849	
International Journal of Chemical Engineering	John Wiley and Sons Ltd	41	0.487	Q2
International Journal of Food Science		44	0.685	
Biomass Conversion and Biorefinery	Springer Verlag	56	0.702	
Chemical Methodologies	Sami Publishing Company	21	0.726	
CyTA - Journal of Food	Taylor and Francis Ltd.	52	0.453	
Journal of Food Measurement and Characterization	Springer Science + Business Media	55	0.693	
SN Applied Sciences (Discover Applied Sciences)	Springer Nature	74	0.543	

Eventualmente se definieron algunos criterios de inclusión y exclusión:

2.2.1. Criterios de inclusión

- Artículos de investigación publicados en revistas científicas.
- Estudios que investiguen la extracción de pectina con técnicas emergentes para las cáscaras de diversas fuentes vegetales, resaltando la de piña.
- Estudios que reporten estrategias y/o parámetros de optimización del proceso de extracción, utilizando la metodología de superficie de respuesta.
- Estudios que proporcionen datos cuantitativos sobre el rendimiento y/o la calidad de la pectina extraída.

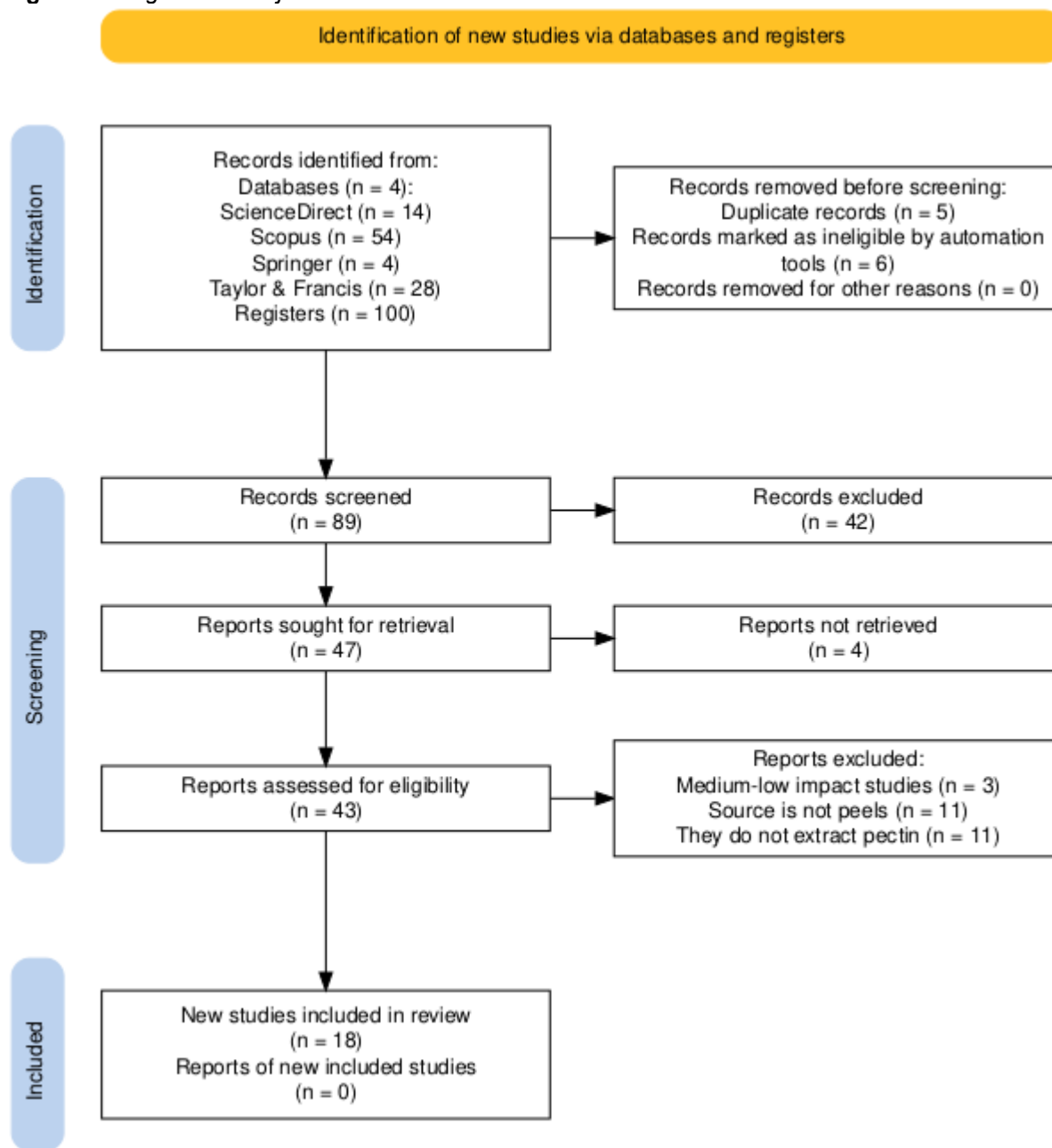
2.2.2. Criterios de exclusión.

- Revisiones, metaanálisis, resúmenes de congresos, patentes, etc.
- Estudios que no se relacionen con el eje central de investigación.
- Estudios cuya fuente de extracción no sean las cáscaras.
- Estudios que no se centren en la extracción de pectina.
- Estudios de revistas con impacto medio-bajo o con menor impacto relativo.

De acuerdo con esto y únicamente leyendo los títulos, se consideraron 47 estudios, tras descartar 18 que no clasificaban como artículos de investigación (i.e., revisiones, metaanálisis, resúmenes de congresos, patentes, etc.), 24 que no se relacionaban con el eje central de la investigación, y estudios no recuperados (n = 4), es decir, no estaban disponibles. Luego, al verificar cada resumen se excluyeron estudios cuya fuente de extracción no eran las cáscaras (n = 11), pues otro tipo de subproductos (e.g., bagazo, pulpa, orujo) comprenden una composición fisicoquímica diferente y el procesamiento no es similar, lo cual se traduce en resultados muy desiguales. También se excluyeron estudios que no se centraban en extraer pectina (n = 11) sino otro tipo de componentes (e.g., celulosa, compuestos fenólicos, flavonoides), además de otros estudios que se catalogaban como de impacto medio-bajo (n = 3) según SCImago Journal & Country Rank, pues esto aumentaría la posibilidad

de incurrir en errores metodológicos o conclusiones menos robustas, por lo que requerirían una revisión más detallada.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA.



Con todo esto, el restante (n = 18) cumplía con los criterios de inclusión, pues se abordaba el tema de la optimización del proceso de extracción de pectina a partir de diferentes subproductos agroindustriales, empleando técnicas emergentes como las microondas y el ultrasonido. Asimismo, se destaca el uso de la herramienta web creada por Haddaway et al. (2022) para elaborar el diagrama de flujo PRISMA (Figura 1).

2.3. Síntesis de datos

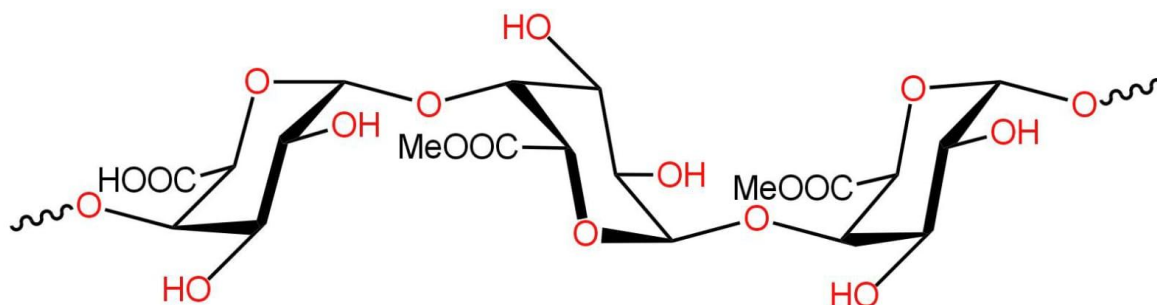
A partir de los estudios seleccionados se recopiló la información sobre la referencia del estudio (autor y año), la fuente vegetal de la pectina (cáscaras de piña, limón, cacao, etc.), la técnica de extracción emergente empleada

(microondas o ultrasonido), las variables del proceso optimizadas (e.g., pH, tiempo, temperatura, potencia, relación líquido-sólido) y sus rangos estudiados, además de los resultados principales que incluyeron el rendimiento de extracción y los parámetros de calidad de la pectina (i.e., contenido de ácido galacturónico/anhidrouónico y grado de esterificación). Esta información fue posteriormente sintetizada y tabulada para facilitar el análisis comparativo y la discusión.

3. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

La extracción de pectina (Figura 2) es un proceso fisicoquímico de múltiples etapas, en el que la temperatura, el pH, las propiedades del disolvente, las características de la fuente y la duración del procedimiento contribuyen a la solubilización de la pectina de los tejidos vegetales, su hidrólisis y recuperación. Los métodos convencionales, como el método soxhlet y la extracción con ácido diluido caliente, pueden ser lentos (1-10 h), con frecuencia producen rendimientos limitados o requieren grandes cantidades de ácido y energía, generando importantes volúmenes de residuos y emisiones de CO₂ (Zakaria et al., 2023). Estas condiciones pueden provocar la degradación de la pectina, acotando sus aplicaciones. Por ende, estos procesos no se consideran ecológicos ni sostenibles (Wani & Uppaluri, 2022). Para abordar estas limitaciones, los investigadores han utilizado tecnologías de extracción emergentes junto con la metodología de superficie de respuesta (RSM), ya que permite determinar las condiciones óptimas para obtener el máximo rendimiento y la calidad deseada de la pectina extraída, reduciendo el tiempo y los costos asociados (Chua et al., 2022).

Figura 2. Sección parcialmente metilada de una molécula de pectina.



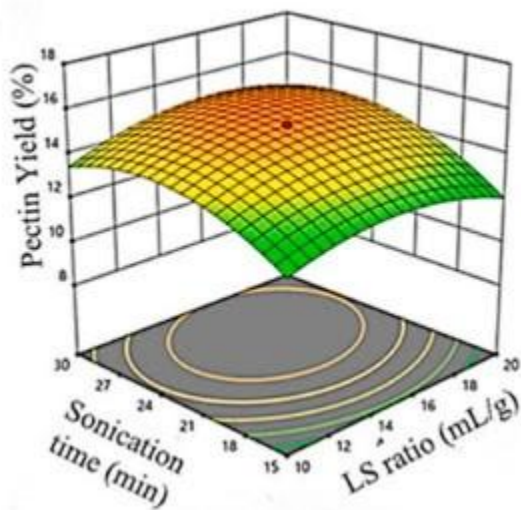
Dentro de las técnicas emergentes utilizadas para extraer pectina de las cáscaras de piña están la extracción asistida por microondas (MAE) y la extracción asistida por ultrasonido (UAE). La MAE permite acelerar el proceso de extracción y producir alto rendimiento de pectina (Sarah et al., 2022) al aplicar el calentamiento dieléctrico, donde el solvente polar (e.g., agua, soluciones ácidas) absorbe la radiación de microondas, generando calor que acelera la transferencia de masa y destruye la pared celular, liberando así sus componentes (Rivadeneira et al., 2020). Su eficiencia depende de varios factores, que incluyen la potencia, el tiempo, la relación líquido-sólido y el pH del solvente (Zakaria et al., 2023). Con la ventaja de reducir sustancialmente el tiempo de ebullición y la cantidad de solvente a utilizar. No obstante, su principal desventaja radica en la sensibilidad de la pectina a las condiciones de extracción, ya que un control inadecuado de los parámetros puede llevar a su degradación, afectando negativamente el rendimiento y las propiedades funcionales (Pangestu et al., 2020). De igual forma, se ha empleado la MAE en otros estudios de extracción desde cáscaras de banano, cacao, cardamomo, cebolla, limón, mandarina, naranja, nuez, papaya y pomelo.

Por otra parte, la extracción asistida por ultrasonido (UAE) utiliza ondas de alta frecuencia –generalmente superiores a 20 kHz– para mejorar la extracción de compuestos de fuentes naturales (Saurabh et al., 2023). Se apoya en el efecto de cavitación acústica en el medio solvente para romper el tejido vegetal, mejorando la solubilidad de la pectina y su difusión desde la matriz de la planta (Sun et al., 2024). Dicha cavitación consiste en la formación, crecimiento e implosión de burbujas microscópicas en el líquido (Vathsala et al., 2024); la implosión de estas burbujas genera fuerzas de corte elevadas, que pueden romper las membranas biológicas y facilitar la penetración del solvente en los materiales celulares, lo que a su vez mejora la liberación de los compuestos deseados (Saurabh et al., 2024). Una de sus mayores ventajas radica en su capacidad para extraer compuestos a bajas temperaturas, con el beneficio adicional de reducir el consumo de energía y el uso de solventes (Chua et al., 2020), aunque requiere de un control cuidadoso para evitar la degradación del producto. El modo pulsado de

la UAE ayuda a mitigar este problema al permitir fases de relajación que liberan el calor moderado y reducen la destrucción de compuestos bioactivos (Wani & Uppaluri, 2024). Esta técnica también se ha utilizado en estudios de extracción a partir de cáscaras de cebolla, limón, pitahaya, pomelo y yaca.

Para optimizar estos procesos de extracción, los investigadores aplicaron la RSM, con lo cual identificaron los parámetros que influían en el rendimiento y la calidad (Tabla 2), así como los rangos en los que se movería cada factor. Con esto definido, se aplicó un diseño experimental con el cual se creó la matriz en la que cada combinación de los factores se probó de manera controlada para obtener datos precisos sobre las variables de respuesta y de tal manera, ajustar un modelo polinómico de segundo orden –para evaluar el efecto individual de cada factor y sus interacciones sobre la respuesta– con posterior ANOVA. Permitiendo así, predecir condiciones óptimas de extracción visualizadas en gráficos de superficie de respuesta (Figura 3) y de este modo replicar tales condiciones para mejorar el proceso. De acuerdo con Chua et al. (2020), esta precisión se verifica comparando los resultados experimentales con los predichos, cuya variación debe ser menor al 5%.

Figura 3. Gráfico de superficie de respuesta.



Sin el uso de la RSM, encontrar este punto óptimo a través de experimentos de una sola variable o por prueba y error sería un proceso considerablemente más largo, costoso y menos eficiente (Abdul et al., 2024), además de que no revelaría las interacciones entre los factores, tal como el efecto de la potencia en MAE que cambia con el pH, o la temperatura en UAE que se optimiza con un pH específico. De manera que estas interacciones para una verdadera optimización pasarían desapercibidas.

A raíz de esto, Zakaria et al. (2023), notaron que a menor relación líquido-sólido, el proceso mejoró, porque la ruptura de la pared celular facilitó la penetración del solvente y aumentó la disolución de la pectina, principalmente porque un mayor tamaño de poro en la pared celular contribuyó a una mejora del rendimiento. Aunque no fue excepcionalmente alto con respecto al obtenido con ultrasonido (Tabla 2). Por su parte, Shivamathi et al. (2022), observaron que la óptima relación líquido-sólido se atribuyó al contacto directo entre el solvente y el material vegetal, así como a la mejora en la penetración del solvente y la transferencia de masa facilitada por las ondas ultrasónicas. Logrando de este modo pectina libre de toxinas con buenas propiedades gelificantes y alto contenido de metoxilo. No obstante, el rendimiento obtenido se sitúa en un rango intermedio al compararlo con otras fuentes, pues Saurabh et al. (2023), tuvieron un rendimiento inferior de cáscara de yaca, mientras que en otros estudios lograron un rendimiento mucho mayor a partir de cáscaras de pitahaya, pomelo y limón (Chua et al., 2020; Vathsala et al., 2024; Pei et al., 2024).

3.1. Influencia de los parámetros de extracción

Hay una variedad de métodos utilizados para caracterizar la pectina extraída dentro de las investigaciones con cáscaras de piña, los cuales van desde su análisis estructural hasta sus propiedades térmicas, morfológicas y funcionales. Su elección depende de los objetivos del estudio y de las propiedades específicas que se deseen

investigar (Vathsala et al., 2024). La mayoría de los métodos fisicoquímicos típicamente se precisan mediante una titulación, mientras que, aquellos que buscan proporcionar información detallada sobre la estructura y composición de la pectina normalmente emplean la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) u otras técnicas instrumentales más avanzadas como la resonancia magnética nuclear o la cromatografía líquida de alta resolución (Mao et al., 2023; Pei et al., 2024).

Tabla 2. Condiciones de extracción de pectina empleando diferentes técnicas emergentes.

Técnica	Fuente	Parámetros	Rendimiento	Calidad	Referencia
Microondas	Cáscaras de Banano & papaya	Temperatura: 73 °C pH: 2.00 (C ₆ H ₈ O ₇) Tiempo: 35 min	23.74%	AUA: 69.97% DE: 67.91%	Mada et al. (2022)
	Cáscara de cacao	Tiempo: 30 min Potencia: 450 W Concentración: 10% (C ₆ H ₈ O ₇)	21.10%	GalA: 72.86%	Sarah et al. (2020)
	Cáscara de cardamomo	Potencia: 555.18 W pH: 2.79 (HNO ₃) Tiempo: 40.69 min	4.74%	DE: 67.96%	Mbaku et al. (2023)
	Cáscara de limón	Tiempo: 4 min pH: 1.00 (C ₆ H ₈ O ₇) Potencia: 450 W	41.40%	GalA: 15.60% DE: 42%	Pei et al. (2024)
	Cáscara de naranja	Potencia: 450 W pH: 1.50 (C ₆ H ₈ O ₇)	36.02%	DE: 45.40%	Abdul et al. (2024)
	Cáscara de nuez	Temperatura: 74 °C Potencia: 400 W Tiempo: 16 min Relación: 25 mL/g	34.13%	AUA: 76.03% DE: 59.88%	Sindhu et al. (2024)
	Cáscara de piña	Potencia: 600 W pH: 1.52 (H ₂ SO ₄) Relación: 10 mL/g	2.43%	AUA: 54.61% DE: 65.48%	Zakaria et al. (2023)
Ultrasonido	Cáscara de limón	Tiempo: 60 min pH: (C ₆ H ₈ O ₇) Temperatura: 55 °C	37.90%	GalA: 20.20% DE: 37.30%	Pei et al. (2024)
	Cáscara de piña	Relación: 15.20 mL/g Tiempo: 21.88 min Temperatura: 70.83 °C pH: 1.00 (HCl)	16.24%	AUA: 75.64% DE: 85-90%	Shivamathi et al. (2022)
	Cáscara de pitahaya	Tiempo: 32 min Temperatura: 85 °C Relación: 30 mL/g	23.09%	DE: 33.27%	Chua et al. (2020)
	Cáscara de pomelo	Tiempo: 9.38 min Potencia: 44.01% Relación: 46.80 mL/g	26.35%	GalA: 69.11% DE: 22.14%	Vathsala et al. (2024)
	Cáscara de yaca	Potencia: 30% Tiempo: 12.23 min Concentración: 0.13 N (C ₂ H ₂ O ₄)	12.04%	GalA: 68.65% DE: 38.11%	Saurabh et al. (2023)

3.1.1. Peso equivalente

Es el contenido total de ácido galacturónico (GalA) no esterificado, presente en las cadenas moleculares de la pectina (Sindhu et al., 2024) y se considera indicador de la capacidad de formación del gel (Mada et al., 2022). La pectina de extraída de cáscaras de piña con ambas técnicas exhibió excelentes resultados (i.e., 1250, 1115), siendo esto un buen indicador de la fuente, pues en el caso de otras pectinas, como las obtenidas de cáscaras de yaca (Saurabh et al., 2023) y nuez (Sindhu et al., 2024), se obtuvieron valores muy inferiores (i.e., 365.96, 576.99).

De acuerdo con Sarah et al., (2022), y Benmebarek et al. (2024), quienes también obtuvieron altos valores a partir de cáscaras de mandarina y cacao, esto se atribuye a la descomposición de las cadenas lineales de pectina durante la extracción (Saurabh et al., 2023), producto de una duración prolongada del proceso (Zakaria et al., 2023). Cabe mencionar que este valor normalmente es adimensional porque se define en función de su capacidad de gelificación, en lugar de una unidad de masa convencional.

3.1.2. Contenido de metoxilo

Es un parámetro que describe la cantidad de grupos carboxilo esterificados con metanol presentes en la estructura molecular (Mada et al., 2022) y permite su clasificación entre pectina de alto metoxilo (HM) o de bajo metoxilo (LM). La pectina HM cuenta con un contenido de metoxilo mayor al 7% (Vathsala et al., 2024), mientras que, la pectina LM tiene un valor inferior. En general, cuanto mayor es el contenido de metoxilo, mejor es la capacidad de gelificación. No obstante, las pectinas LM pueden formar geles sin la necesidad de azúcar o limitaciones de pH, pero requieren la presencia de calcio u otros cationes divalentes (Sindhu et al., 2024).

Los métodos emergentes (i.e., MAE, UAE) ofrecen ventajas como tiempos de extracción reducidos y potencial para la extracción selectiva, adaptada para obtener pectinas con contenido de metoxilo específico (Pei et al., 2024). Factores como el pH y el tiempo influyen en el resultado, porque condiciones muy ácidas, así como un procedimiento prolongado promueven la desesterificación de las cadenas de GalA, reduciendo la cantidad de grupos éster metilo (Benmebarek et al., 2024). En consecuencia, un exceso tiende a generar pectinas de bajo metoxilo. Abdul et al., (2024), y Chua et al. (2020), caracterizaron la pectina de cáscara de pitahaya y de naranja, como de bajo metoxilo, mientras que la pectina de banano y papaya mixtas (Mada et al., 2022), al igual que la de piña (Shivamathi et al., 2022), fueron de alto metoxilo, esta última comparable con la de grado comercial. Öztürk et al., (2024), adaptaron la MAE junto con alta presión y también consiguieron pectina HM de cáscaras de pomelo, evidenciando el potencial de un enfoque no explorado en las técnicas emergentes que comprenden la revisión.

3.1.3. Contenido de ácido anhidrouónico (AUA)

El GalA es el bloque de construcción predominante en la estructura principal de la pectina y, por lo tanto, su contenido, a menudo expresado como contenido de AUA, se utiliza para evaluar la pureza de la pectina (Vathsala et al., 2024). La mayoría de los valores reportados en las fuentes cumplen con el requisito de pureza de 65% para pectina de grado alimentario. No obstante, las condiciones de extracción más ácidas favorecen la liberación de pectina soluble al hidrolizar otras partes de la pared celular, lo que aumenta la concentración de cadenas pécticas más puras en el extracto (Zakaria et al., 2023). Contrastando parcialmente con otros estudios donde el pH bajo a veces disminuía el contenido; dejando implícito que los efectos pueden ser específicos de la fuente y el método.

En cuanto a la cáscara de piña, la Tabla 2, presenta un porcentaje bastante alto para la pectina extraída con ultrasonido, en comparación a la extraída con microondas, según Zakaria et al. (2023) esto se dio a causa de una disminución en la relación líquido-sólido, aunque se requiere de una purificación adicional para descartar impurezas. Por otro lado, la extracción llevada a cabo con la cáscara de limón (Pei et al., 2024) tuvo altos rendimientos, pero a su vez, un contenido de GalA bajo en ambos procesos (i.e., MAE, UAE), lo cual refleja la importancia del control en los parámetros de extracción. Riyamol & Jeevitha (2024), en su estudio con cáscaras de cebolla combinaron la MAE y la UAE con solventes eutécticos profundos, dando como resultado un contenido de AUA considerable (81.90%), siendo esto una estrategia interesante para mejorar el producto final.

3.1.4. Grado de esterificación (DE)

Indica la proporción de grupos carboxilo que están esterificados con metanol, varía según la especie, sus partes y la madurez alcanzada, pero disminuye con el tiempo (Pei et al., 2024). Además, controla el efecto gelificante de la pectina (Mada et al., 2022) y por ende es un indicador de calidad (Sindhu et al., 2024). De manera que la pectina con DE > 50% será HM y aquella con un DE < 50% será LM.

Las condiciones extremas de extracción (i.e., alta potencia, tiempo prolongado) promueven la desesterificación, ya que pueden degradar las cadenas e hidrolizar los enlaces éster, dando como resultado un DE más bajo (Vathsala et al., 2024). Pei et al. (2024), encontraron que cuando el pH < 2.00, el producto tendía a ser pectina de bajo metoxilo, como fue el caso de las cáscaras de pitahaya, mandarina y limón (Chua et al., 2020; Benmebarek

et al., 2024; Vathsala et al., 2024). Por el contrario, con un pH > 2.00, el producto máximo obtenido era pectina de alto metoxilo. Como se observa en la Tabla 2, la pectina de cáscara de piña extraída por Shivamathi et al. (2022), mostró un DE que osciló entre 85-90%, mientras que aquella extraída por Zakaria et al. (2023), tuvo 65.48%, implicando en ambos casos, pectina de alto metoxilo (HMP). Según Öztürk et al. (2024), un DE > 70% confiere la capacidad de formar un gel de fraguado rápido.

3.1.5. Otras propiedades

Propiedades funcionales como la viscosidad y la capacidad emulsionante también han tenido lugar en las investigaciones con cáscaras de piña. La viscosidad, en el contexto de una matriz polimérica, indica su capacidad para aumentar la viscosidad de un fluido y esta influenciada por su peso molecular (Shivamathi et al., 2022). Cuando la temperatura sube, la viscosidad disminuye, ya que el calor dispersa las moléculas y reduce sus interacciones, facilitando el movimiento del fluido. Según Zakaria et al. (2023), la viscosidad de las soluciones aumenta junto con la concentración, pues pasó de 1.99 mPa a 6.91 mPa cuando la concentración se incrementó del 0.10% al 2.00%. Por otro lado, la capacidad que tiene la pectina para formar y estabilizar emulsiones se mide a partir de su actividad emulsionante (EA) y estabilidad emulsionante (ES). La pectina de cáscara de piña presentó un valor (EA: 45%) cercano al de la pectina comercial (50%) y otro (ES: 93.80%) superior al de la pectina comercial (88.20%). Factores como la concentración y el pH de la solución, influyen en estas propiedades (Mada et al., 2022; Zakaria et al., 2023).

En estos estudios, la similitud entre los espectros o las bandas funcionales identificadas en la pectina extraída de las cáscaras de piña y la pectina comercial de grado estándar confirman que el material extraído es de hecho pectina y posee los principales grupos funcionales y características estructurales esperadas para este tipo de polisacárido (Mada et al., 2022). Lo cual valida el potencial de estas cáscaras como fuentes alternativas de pectina para diversas aplicaciones. Cabe mencionar que, si bien el FTIR identifica los grupos funcionales, otras técnicas adaptan su uso para cuantificar propiedades como el DE o el contenido de AUA (Sindhu et al., 2024), ya que la información de la intensidad relativa de los picos de carbonilo esterificado y libre respalda la determinación de estas propiedades (Pei et al., 2024).

A pesar de su indiscutible utilidad, es importante señalar que la RSM en estos estudios se limita a la escala de laboratorio. La validación de los modelos de RSM a escala piloto o industrial es un paso esencial y no siempre se aborda en la literatura, lo cual representa una laguna importante para la implementación real de estas técnicas en la industria (Abdul et al., 2024).

4. CONCLUSIONES

El análisis de la evidencia confirma que las técnicas emergentes estudiadas ofrecen ventajas considerables sobre los métodos convencionales para la extracción de pectina de cáscaras de piña, pues ambas han demostrado ser efectivas en la obtención del biopolímero. Específicamente, la UAE alcanzó un rendimiento del 16.24% bajo condiciones óptimas de 70.83°C, un pH de 1.00 y 21.88 min de procesamiento. Por su parte, la MAE, si bien mostró un rendimiento menor (2.43%) bajo condiciones optimizadas de 600 W, pH de 1.52 y relación líquido-sólido de 10 mL/g, demostró ser altamente competitiva en cuanto de calidad se trata (i.e., alto peso equivalente, alto DE, buena capacidad emulsionante). Logrando de este modo, pectina con características fisicoquímicas y funcionales valiosas, comparables con la de grado comercial.

La inclusión de la RSM ha ganado relevancia en los últimos años, especialmente en estos procesos, ya que facilita la evaluación simultánea de múltiples factores y su efecto en las respuestas (i.e, rendimiento, contenido de AUA), reduciendo el número de ensayos requeridos en comparación con métodos univariados, que de otro modo sería muy extenso. No obstante, La elección del método de extracción dependerá de los objetivos específicos, la infraestructura disponible y la priorización de factores como el rendimiento máximo absoluto versus la eficiencia energética y el tiempo de procesamiento.

La disponibilidad de literatura específica sobre la optimización del proceso de extracción de pectina para esta fuente fue una de las limitaciones de esta revisión, aun así, con los estudios analizados, se pudo proyectar un panorama adecuado sobre las técnicas emergentes utilizadas, ya que la información permitió vislumbrar su

potencial. Se sugiere elaborar más investigaciones sobre la fuente y/o que futuras investigaciones adopten enfoques combinados de las técnicas de extracción, con el fin de explorar efectos, nuevas perspectivas y resultados que pudiesen enriquecer el área en cuestión. La valorización de las cáscaras de piña mediante la extracción optimizada de pectina con tecnologías emergentes representa una alternativa científicamente respaldada y ambientalmente consciente, ofreciendo oportunidades prometedoras para la innovación sostenible en la agroindustria y sectores afines, al reducir la dependencia de las materias primas tradicionales como los cítricos y las manzanas.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional durante mi etapa de formación profesional, así como a la universidad, por el conocimiento brindado.

6. DECLARACION DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los autores declaran que no han usado herramientas de inteligencia artificial (IA) en la creación de este artículo.

7. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdul Sattar, O. D., Khalid, R. M. and Yusoff, S. F. M. (2024). Electromagnetic pre-treatment for extraction of bitter orange peel pectin: Response surface methodology yield/degree of esterification. *Chemical Methodologies*, 8(3), 217-233. <https://doi.org/10.48309/chemm.2024.437672.1760>

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>

Chua, B. L., Tang, S. F., Ali, A., & Chow, Y. H. (2020). Optimisation of pectin production from dragon fruit peels waste: drying, extraction and characterisation studies. *SN Applied Sciences*, 2(4). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2415-y>

Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO. (2024). *Adapting to climate change in the tropical fruit industry: A technical guide for pineapple producers and exporters*. <https://doi.org/10.4060/cc9310en>

González Cerón, S. P. (2024). *Contexto de cadena piña*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA. <https://doi.org/20.500.12324/39774>

Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., & McGuinness, L. A. (2022). PRISMA2020: An R package and shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and open synthesis. *Campbell Systematic Reviews*, 18(2). <https://doi.org/10.1002/cl2.1230>

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 & Nutrition*, 10(4), 1222-1238. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2754>

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, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2023/5277914>

Öztürk, T., Özbek, H. N., & Koçak Yanık, D. (2024). Environmentally friendly approach to pectin extraction from grapefruit peel: Microwave-assisted high-pressure CO₂/H₂O. *Foods*, 13(3), 476. <https://doi.org/10.3390/foods13030476>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2022). A declaração PRISMA 2020: Diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 46, 1. <https://doi.org/10.26633/rpsp.2022.112>

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>

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>

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>

Riyamol & Jeevitha G.C. (2024). Microwave and ultrasound-assisted natural deep eutectic solvents-based extraction of pectin from onion peel wastes. *CyTA - Journal of Food*, 22(1). <https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2311215>

Sarah, M., Hasibuan, I. M., Misran, E., & Maulina, S. (2022). Optimization of microwave-assisted pectin extraction from cocoa pod husk. *Molecules*, 27(19), 6544. <https://doi.org/10.3390/molecules27196544>

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>

Shivamathi, C. S., Gunaseelan, S., Soosai, M. R., Vignesh, N. S., Varalakshmi, P., Kumar, R. S., Karthikumar, S., Kumar, R. V., Baskar, R., Rigby, S. P., Syed, A., Elgorban, A. M., & Ganesh Moorthy, I. M. (2022). Process optimization and characterization of pectin derived from underexploited pineapple peel biowaste as a value-added product. *Food Hydrocolloids*, 123, 107141. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107141>

Sindhu, O., Chandraprabha, M. N., Divyashri, G., & Krishna Murthy, T. P. (2024). Optimization of microwave-assisted pectin extraction from walnut shells and evaluation of its physicochemical and biological attributes. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 42, 101795. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101795>

Sun, Z., Wang, S., Zhou, C., Ma, Z., & Qian, F. (2023). Optimization of ultrasound assisted organic acid extraction of pectin from pomelo peel by response surface methodology and its preliminary characterization. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(17), 20129-20141. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04200-1>

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>

Wani, K. M., & Uppaluri, R. V. S. (2022). Continuous and pulsed ultrasound-assisted extraction of pectin from pomelo fruit peel using citric acid. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(22), 28603-28618. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03513-x>

Zakaria, N. A., Abd Rahman, N. H., Rahman, R. A., Zaidel, D. N. A., Hasham, R., Illias, R. Md., 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>