



UNAAT

EXCELENCIA CIENTÍFICA Y ACADÉMICA
CON RESPONSABILIDAD SOCIAL

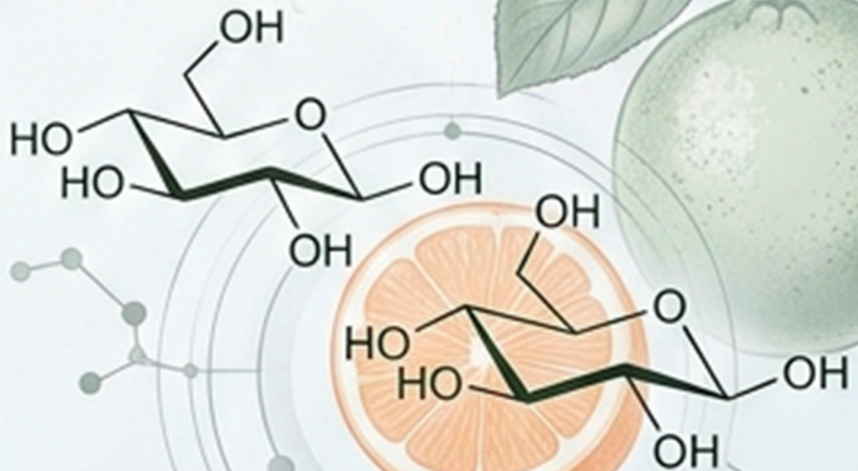
Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma

Pectina, biopolímero funcional

Tecnologías emergentes de extracción y
aplicaciones multifuncionales para
una agroindustria sostenible

AUTORES:

- › **Rafael Julian** Malpartida Yapias
- › **Lesly Edith** Yata Franco
- › **Laumer Tacto** Yajahuanca
- › **Franklin** Ore Areche
- › **Jimmy Pablo** Echevarría Victorio



Fondo Editorial:



UNAAT
EXCELENCIA CIENTÍFICA Y ACADÉMICA
CON RESPONSABILIDAD SOCIAL

Pectina, biopolímero funcional



Pectina, biopolímero funcional: tecnologías emergentes
de extracción y aplicaciones multifuncionales para una
agroindustria sostenible

Rafael Julian Malpartida Yapias
Lesly Edith Yata Franco
Laumer Tocto Yajahuanca
Franklin Ore Areche
Jimmy Pablo Echevarría Victorio

**Rafael Julian Malpartida Yapias / Lesly Edith Yata Franco /
Laumer Tocto Yajahuanca / Franklin Ore Areche /
Jimmy Pablo Echevarría Victorio**

100 pp.; 17x24cm

Pectina biopolímero funcional: tecnologías emergentes de extracción y aplicaciones multifuncionales para una agroindustria sostenible

Editado por:

© Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma, Vicepresidencia de Investigación - Fondo Editorial. Carretera La Florida - Cochayoc Km2, Huancucro N° 2092 Acobamba, Tarma - Junín, Perú.

ISBN: 978-612-99147-8-7

1° edición digital

Abril 2026

Hecho en Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú

N°: 2026-03677

Libro electrónico disponible en DOI:

Proceso de revisión

Fue revisado por pares externos en modalidad de doble ciego.

- **Revisor A:** Olivia Magaly Luque Vilca 

- **Revisor B:** Jorge Arturo Zegarra Flores 

Diseño de cubierta y maquetación de interiores:

Alfredo Carhuancho Fabián

Oficina de Comunicación e Imagen Institucional

Publicado en el Perú / Published in Peru

Todos los derechos reservados. Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, sin autorización escrita del autor.

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestra profunda gratitud a todos aquellos que han contribuido a esta obra, especialmente al Instituto de Investigación en Tecnologías Altoandinas de la Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma por su indispensable apoyo en el uso de los laboratorios. Su generosidad ha permitido llevar a buen término esta investigación.

RESUMEN

La pectina, un polisacárido presente de forma natural en las paredes celulares de frutas y verduras, desempeña un papel fundamental en diversas aplicaciones gracias a sus propiedades gelificantes, espesantes, emulsionantes y estabilizantes. El proceso de extracción implica la ruptura de la pared celular vegetal para liberar la pectina. La extracción ácida convencional se ha utilizado ampliamente, pero los avances tecnológicos han impulsado el desarrollo de métodos ecológicos y emergentes como la extracción asistida por enzimas, microondas, ultrasonido, calentamiento óhmico, alta presión y agua subcrítica. Estos métodos buscan no solo mejorar el rendimiento, el tiempo y la pureza de la pectina extraída, sino también minimizar el impacto ambiental y el consumo energético. La versatilidad de la pectina la ha posicionado como un ingrediente valioso en la industria alimentaria para la producción de mermeladas, zumos, jaleas, conservas, productos lácteos y sustitutos de grasa. Además, como biopolímero, la pectina ha despertado interés por sus posibles aplicaciones en sistemas de envasado activo e inteligente. En el sector biomédico y farmacéutico, ha sido utilizada como un prometedor método para la administración de fármacos, probióticos, cicatrización de heridas, ingeniería de tejidos y su potencial para el tratamiento contra el cáncer.

Debido a su naturaleza no tóxica, biocompatible y biodegradable, también ha sido empleada para la encapsulación de compuestos bioactivos, eliminación de metales del agua y adsorbente de tintes de diferentes industrias. En este contexto, el presente libro ofrece una revisión exhaustiva de la literatura sobre la pectina, abordando su estructura, fuentes, propiedades, así como los métodos convencionales

y emergentes de extracción. Asimismo, se analizan sus aplicaciones en la industria alimentaria, biomédica, farmacéutica y en otros campos emergentes, con especial énfasis en la pectina obtenida a partir de residuos agroalimentarios, en el marco de una agroindustria más sostenible y orientada hacia la economía circular.

Palabras claves: Valorización de residuos, tecnologías verdes de extracción, pectina, aplicaciones emergentes.

ABSTRACT

Pectin, a polysaccharide naturally present in the cell walls of fruits and vegetables, plays a key role in various applications thanks to its gelling, thickening, emulsifying, and stabilizing properties. The extraction process involves breaking down the plant cell wall to release the pectin. Conventional acid extraction has been widely used, but technological advances have driven the development of environmentally friendly and emerging methods such as enzyme-assisted extraction, microwave extraction, ultrasound extraction, ohmic heating extraction, high-pressure extraction, and subcritical water extraction. These methods seek not only to improve the yield, time, and purity of the extracted pectin, but also to minimize environmental impact and energy consumption. The versatility of pectin has positioned it as a valuable ingredient in the food industry for the production of jams, juices, jellies, preserves, dairy products, and fat substitutes. In addition, as a biopolymer, pectin has attracted interest for its potential applications in active and smart packaging systems. In the biomedical and pharmaceutical sector, it has been used as a promising method for drug delivery, probiotics, wound healing, tissue engineering, and its potential for cancer treatment.

Due to its non-toxic, biocompatible, and biodegradable nature, it has also been used for the encapsulation of bioactive compounds, removal of metals from water, and as an adsorbent for dyes in various industries. In this context, this book offers a comprehensive review of the literature on pectin, addressing its structure, sources, properties, as well as conventional and emerging extraction methods. It also analyzes its applications in the food, biomedical, pharmaceutical, and

other emerging industries, with a special emphasis on pectin obtained from agri-food waste, within the framework of a more sustainable agribusiness oriented toward the circular economy.

Keywords: Waste recovery, green extraction technologies, pectin, emerging applications.

CONTENIDO

Agradecimientos	5
Resumen	7
Abstract	9
Contenido	11
Introducción	13
Capítulo I: Fundamentación teórica de la pectina	17
1.1. Definición	17
1.2. Estructura de la pectina	17
1.3. Tipos de pectina	18
1.4. Residuos agroindustriales como fuentes de pectina	19
1.5. Caracterización de la pectina: Rendimiento y propiedades	21
Capítulo II: Métodos de extracción de la pectina	31
2.1. Generalidades	31
2.2. Preparación de muestra	32
2.3. Extracción convencional	33
2.4. Extracción mediante tecnologías emergentes	34
2.4.1. Extracción asistida por enzimas (EAE)	36
2.4.2. Extracción asistida por ultrasonido (UAE)	40
2.4.3. Extracción asistida por microondas (MAE)	43
2.4.4. Extracción con agua subcrítica (SWE)	47
2.4.5. Extracción asistida por calentamiento óhmico (OHAE)	50
2.5. Integración de tecnologías emergentes	53
2.5.1. Extracción asistida por ultrasonidos y microondas	53
2.5.2. Extracción enzimática asistida por ultrasonido (UEAE)	57
2.5.3. Extracción asistida por enzimas y microondas (MEAE)	59
2.5.4. Extracción en agua subcrítica asistida por microondas (MASWE)	60

Capítulo III: Aplicaciones tradicionales y emergentes de la pectina	61
3.1. Aplicación de la pectina en la industria agroalimentaria	61
3.1.1. Pectina como sustituto de grasa	62
3.1.2. Potencial aplicación de la pectina en la fabricación de alimentos impresos en 3D	64
3.1.3. Pectina como insumo potencial para el envasado de alimentos	67
3.2. Aplicaciones biomédicas y farmacéuticas de la pectina	75
3.2.1. Pectina para la administración de fármacos	75
3.2.2. Pectina como apósitos para cicatrización de heridas	76
3.2.3. Pectina en el tratamiento del cáncer	78
3.2.4. Otras aplicaciones biomédicas y farmacéuticas de la pectina	80
3.3. Otras aplicaciones de la pectina	81
3.3.1. Pectina para la eliminación de metales en el agua	82
3.3.2. Pectina como absorbente	83
Capítulo IV: Aplicaciones tradicionales y emergentes de la pectina	87
Referencias	91

INTRODUCCIÓN

Cada año, la producción, industrialización y consumo de alimentos está generando toneladas de residuos (Gerschenson et al., 2021; Prado et al., 2024), causando graves problemas ambientales y económicos (Mellinas et al., 2022). Se estima que solo la industria manufacturera de alimentos genera el 39% de los residuos (Drishya & Wani, 2024), de los cuales 45%, este compuesto principalmente por verduras y las frutas.

Si bien los residuos agroalimentarios generan serias preocupaciones ambientales por su volumen y contribución a los gases de efecto invernadero (Sharma et al., 2025), en los últimos años se ha observado un cambio de paradigma: lejos de ser considerados desechos, hoy se reconocen como valiosas fuentes con potencial de aprovechamiento. Esta comprensión ha impulsado la investigación sobre cómo utilizar estos subproductos de forma sostenible, siguiendo las ideas de la economía circular y el objetivo de lograr cero residuos (Durga et al., 2025).

Una de las aplicaciones alentadoras de la valorización de los desechos agroalimentarios es la recuperación de biopolímeros, particularmente pectina, un heteropolisacárido encontrado en las cáscaras de frutas y verduras (Benmebarek et al., 2025). La pectina tiene una variedad de usos en las industrias alimentaria, farmacéutica y de la salud. En el procesamiento de alimentos, actúa como espesante, emulsionante y agente estabilizador; en el ámbito farmacéutico y de la salud, se aplica en la formulación de medicamentos para reducir el colesterol, tratar trastornos gastrointestinales y como apoyo en terapias contra el cáncer (Haque et al., 2025). Por tanto, la extracción de pectina a partir de

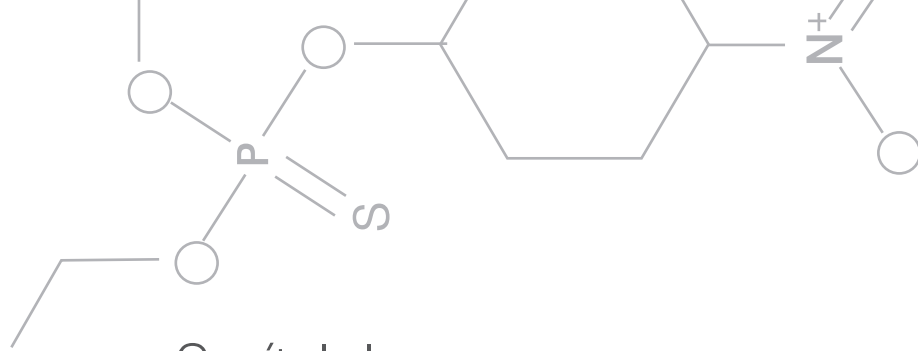
residuos agroalimentarios no solo responde a la creciente demanda del mercado, sino que también contribuye a impulsar una agroindustria más sostenible y respetuosa con el entorno ambiental. En un informe se estimó el mercado mundial de pectina en USD 1190 millones en 2021, con una proyección de ingresos de USD 2120 millones en 2030, indicando una tasa de crecimiento anual compuesta del 6,5 % durante el período de pronóstico (Frosi et al., 2023).

La extracción convencional de la pectina involucra la utilización de altas temperaturas, tiempos prolongados y el uso de ácidos minerales como el HCl, HNO₃ y H₂SO₄ (Carnaval et al., 2024). Estos factores afectan no solo al rendimiento y las características fisicoquímicas de la pectina (Benmebarek et al., 2024), sino que trae consigo inconvenientes ambientales debido a las aguas residuales cargadas con ácidos que se generan durante el proceso (Zioga et al., 2022) y económicos debido a los elevados requerimientos de energía y tiempo (Zheng et al., 2021).

Frente a ello han emergido las tecnologías sustentables como alternativa viable (Duggal et al., 2024); tecnologías como la extracción asistida por enzimas (EAE), extracción asistida por ultrasonido (UAE), extracción asistida por microondas (MAE), extracción con agua subcrítica (SWE), extracción asistida por calentamiento óhmico (OHAE) se presentan como métodos más ecológicos (Haque et al., 2025), permitiendo obtener mayor rendimiento, ahorro de tiempo y energía, además de minimizar el impacto ambiental y maximizar la calidad de la pectina (Dranca et al., 2020).

En esa perspectiva, este trabajo tiene por objetivo brindar una revisión integral sobre la pectina como biopolímero funcional. La revisión abarca desde su estructura, clasificación, fuentes de extracción, rendimiento y la caracterización de sus propiedades más importantes para definir sus potenciales aplicaciones. Asimismo, se examinan tanto los métodos convencionales como las tecnologías ecológicas emergentes, haciendo énfasis en el principio de extracción de cada método y sus implicancias, tanto en el rendimiento de extracción como en la calidad de la pectina.

Finalmente, se presenta una visión general de sus aplicaciones tradicionales y emergentes en el campo alimentario, biomédico, farmacéutico y ambiental. Al examinar exhaustivamente la pectina derivada de los residuos agroalimentarios, contribuimos a los esfuerzos continuos por crear una economía circular y reducir el impacto ambiental de la eliminación de residuos, generando una agroindustria más sostenible.



Capítulo I

Fundamentación teórica de la pectina

1.1. Definición

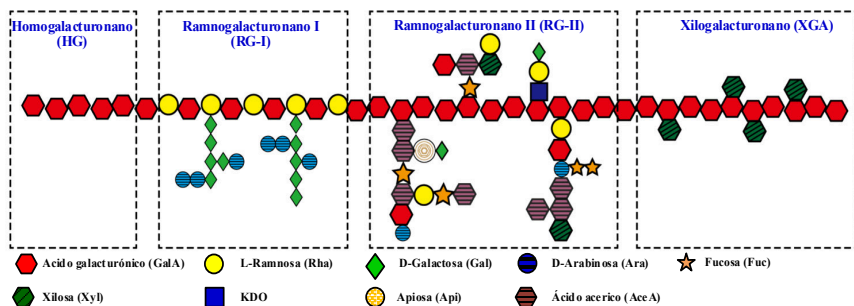
La pectina, es un polisacárido complejo que se encuentra de forma natural en las paredes celulares de frutas y verduras (Cherian et al., 2024), ampliamente utilizado en las industrias alimentaria, farmacéutica y biomédica por sus propiedades gelificantes, espesantes y emulsionantes (Hadidi et al., 2025).

1.2. Estructura de la pectina

Generalmente la pectina es reconocida como un polisacárido heterogéneo rico en ácido d-galacturónico α -1,4-enlazado (GalA). No obstante, estructuralmente, la pectina está compuesta principalmente por 4 tipos estructurales conocidos como dominios de pectina (Figura 1): homogalacturonano (HG), ramnogalacturonano I (RG-I), ramnogalacturonano II (RG-II) y xilogalacturonano (XGA) (Dang et al., 2025); junto con azúcares neutros como ramnosa, arabinosa, galactosa y xilosa y segmentos de galacturonano de cadena larga (Mamiru & Gonfa, 2023).

Figura 1

Modelo esquemático de la estructura de la pectina



Nota. Imagen adaptada de Dang et al. (2025)

El HG y RG-I son los componentes principales, representando aproximadamente el 60-65 % y el 20-35 % de la pectina total, respectivamente. Según, la estructura principal del HG es lineal, formada por unidades repetidas de GalA. Algunas de estas unidades están parcialmente esterificadas con grupos metilo o acetilo, los cuales que influye en su capacidad para formar geles (Assifaoui et al., 2024). Por otro lado, el RG-I se considera una forma ramificada de GalA, ya que contiene residuos de Rha alternando con GalA, y presenta cadenas laterales compuestas por galactanos, arabinanos o arabinogalactanos. De los cuatros componentes, el RG-II es la región más compleja y altamente ramificada, donde también se encuentran residuos de Rha con enlaces α -1,2, a los que se unen diferentes cadenas laterales, que contribuyen a la diversidad estructural y funcional de la pectina (Sharma et al., 2025).

1.3. Tipos de pectina

La clasificación principal de la pectina se basa en su grado de esterificación de metilo, también conocido como grado de metoxilación (DM). El DM está definido como el porcentaje de unidades de GalA metoxilado con respecto al total de unidades de GalA presentes en la pectina, teniendo influencia significativa en las

propiedades de la pectina, como la solubilidad y la formación de gel (Chen et al., 2024). En función a su grado de metoxilación, las pectinas se clasifican en dos tipos: pectina de alto metoxilo (HMP), con un DM superior al 50%, y pectina de bajo metoxilo (LMP), con un DM inferior al 50% como se muestra en la Tabla 1 (Hossain et al., 2024).

Tabla 1
Pectina de bajo y alto grado de metoxilación

Tipo de pectina	LMP	HMP
DM	< 50 %	> 50 %
Mecanismo de gelificación	Reticulación iónica mediante cationes divalentes	Enlace de hidrógeno e interacción hidrofóbica
Requisitos de gelificación		
Aplicación industrial		
Textura de gel	Iones de calcio, bajo contenido de azúcar, amplio rango de pH.	Alto contenido de azúcar (>55 %) y pH bajo (<3,5)
*Fuentes		
*Parámetros de extracción	Postres lácteos, helados, salsas, aderezos y quesos	Mermeladas, jaleas y dulces ácidos con un alto contenido de azúcar
	Firme	Sueve
	Pulpa de remolacha azucarera, zanahoria o desmetilación de HMP	Cáscara de cítricos, pulpa de manzana
	Un pH de 2 a 4 y una temperatura inferior de 60 a 90 °C	Un pH de 1,5–3 y una temperatura superior de 80–100 °C

Nota. La tabla muestra de forma comparativa la pectina de bajo y alto DM adaptado de Hossain et al. (2024) y Benmebarek et al. (2025). * Las fuentes de extracción y los parámetros varían dependiendo del método de extracción (convencional o emergente).

1.4. Residuos agroindustriales como fuentes de pectina

La producción agrícola y el procesamiento alimentario genera cantidades significativas de residuos, causando graves problemas ambientales y económicos. Frente a ello, una de las aplicaciones alentadoras de la valorización de los residuos agroalimentarios es la recuperación de biopolímeros, particularmente pectina (Benmebarek et al., 2025).

Figura 2
Fuentes de extracción de pectina



Las cáscaras y el orujo de frutas cítricas son las fuentes más comunes de fabricación comercial de pectina presentando el 85.5% de la producción, seguido por pulpa de manzana con un 14% y con un pequeño segmento de pulpa de remolacha azucarera (0,5%) (Mamiru & Gonfa, 2023). No obstante, diversas investigaciones han demostrado que la extracción de pectina a partir de frutas no convencionales y residuos generados por la industria de procesamiento representa una estrategia efectiva para reducir los desechos orgánicos e incrementar la producción de pectina (Tabla 2) (Sharma et al., 2025).

En ese sentido, otras fuentes para la extracción de pectina incluyen cáscara de cacao, sandía, cáscaras de fruta del dragón, plátano, mango, yaca, pulpa de papa, chirimoya y cascara de maracuyá, etc (Sharma et al., 2025). Además de los subproductos de frutos secos, como cáscara de pistacho y cáscara de almendra o nuez, también ha sido objeto de estudio para la extracción de e pectina (Frosi et al., 2023).

Tabla 2
Residuos agroindustriales como fuente de pectina

Tipo de residuo	Rendimiento (%)	Autor
Residuos de papa	14,34	(Arrutia et al., 2020)
Cáscara pitahaya roja	17,01	(Thu Dao et al., 2021)
Cáscara pitahaya blanca	13,22	(Thu Dao et al., 2021)
Cáscara maracuyá	18,73	(Thu Dao et al., 2021)
Cáscara de yaca	18,24	(Lal et al., 2021)
Cáscara de kiwi	17,97	(Karbuz & Tugrul, 2021)
Cascarilla de café	40,2	(Divyashri et al., 2023)
Cáscara de pitahaya	17,61	(Nguyen et al., 2022)
Cáscaras mixtas de plátano- papaya	23,78	(Mada et al., 2022)
Cáscara de plátano	15,23	(Quoc, 2022)
Cáscara de cacao	11,73	(Oloye et al., 2023)
Cáscara de yaca	16,83	(Frosi et al., 2023)
Cáscara de almendra	26,32	(Ahsan et al., 2024)
Cáscara de granada	11,56	(Firat et al., 2023)
Residuos de tomate	32,77	(Frosi et al., 2023)
Cáscara de Citrus limetta	28,73	(Panwar et al., 2023)
Cáscara de piña	2,43	(Zakaria et al., 2023)
Cáscara de limón	37,9	(Pei et al., 2024)
Cáscara de pomelo	26,35	(Vathsala et al., 2024)
Cáscara de cacao	24,38	(Pholsin et al., 2024)
Cáscara de naranja	46,09	(Turan et al., 2024)
Pulpa de manzana	22	(Frosi et al., 2023)
Cáscara de plátano	16,46	(Ahsan et al., 2024)
Cáscara de mandarina	30,4	(Benmebarek et al., 2024)
Cáscara de sandía	32,11	(Shourove et al., 2025)
Cáscara de limón	47,5	(Wani & Patidar, 2025)
Cáscara de lima dulce	37,21	(Rai et al., 2025)

1.5. Caracterización de la pectina: Rendimiento y propiedades

A. Rendimiento

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 (Spinei & Oroian, 2023).

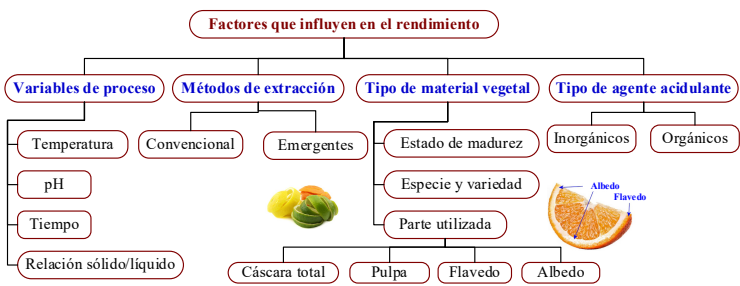
La fórmula general de determinar el rendimiento de extracción se describe en la ecuación 1.

$$Rendimiento\ (\%) = \frac{M}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

Donde M: masa de la pectina desecada; **M0:** masa de la muestra desecada utilizada para la extracción

Hossain et al. (2024) realizaron la extracción de pectina de cáscaras de mando mediante extracción asistida por microondas (MAE), extracción asistida por microondas (UAE) y extracción ácida convencional (EC). Reportaron que el mayor rendimiento se obtuvo como MAE (26,63%), seguido de UAE (21,13%) y por último con EC (16,49%).

Figura3
Principales factores que influyen en el rendimiento de extracción de la pectina



Vathsala et al. (2024) optimizaron las condiciones de extracción de pectina de cáscaras de pomelo y lima dulce mediante UAE. El mejor rendimiento (26,35%) se obtuvo a un tiempo de sonicación de 9,38 min, una potencia ultrasónica del 44,01% y una relación líquido-sólido de 46,8:1. Concluyeron que el tiempo y la relación

líquido-sólido fueron los factores que más influencia tuvieron en la extracción. Dado que un mayor tiempo de sonicación mejora el rendimiento de pectina al favorecer su disolución y difusión de la pectina desde las materias primas sólidas. Así como una mayor relación líquido-sólido reduce dicho rendimiento, posiblemente por alterar el equilibrio dinámico y disminuir la transferencia de masa y la eficacia de la adsorción ultrasónica (Tran et al., 2023).

Otra de las razones de la variabilidad del rendimiento es el tipo y la parte del material vegetal utilizado, como demostraron Arora et al. (2024), quienes lograron rendimientos del 5.57% y 3,09% de pectina para el albedo y flavedo de Citrus máxima extraída con asistencia de microondas, respectivamente.

Finalmente, es importante destacar que la selección del solvente de extracción influye significativamente en el rendimiento de extracción. Duan et al. (2022) extrajeron pectina de cáscara de mandarina Satsuma mediante ácido cítrico asistido por alta presión hidrostática o ácido clorhídrico. Los resultados mostraron que el mayor rendimiento (18,99%) se logró al utilizar ácido cítrico en comparación al 15,34% con HCl. De manera similar, Van Hung et al. (2021) reportaron rendimientos de pectina de cáscara de pomelo con ácido cítrico (9%), acético (8.2%) y láctico (8%).

B. Peso equivalente

El peso equivalente depende principalmente del proceso de extracción de pectina (pH, ácido utilizado, temperatura, entre otros) y del número de ácidos libres disponibles en la pectina, que varía según la naturaleza del material vegetal (Mamiru & Gonfa, 2023).

Para determinar el peso equivalente, se utiliza el método volumétrico; para ello se disuelve 0,5 g de pectina en 100 mL de agua destilada y añade 1 g de NaCl. La solución obtenida es mezclada con 4-5 gotas de fenolftaleína y titulada contra NaOH al 0.1 N hasta un color rosa y el peso equivalente es calculada mediante la siguiente ecuación (Akachat et al., 2025).

$$PE = \frac{\text{Pectina en polvo (g)} * 1000}{\text{Volumen NaOH (mL)} * \text{Normalidad NaOH (N)}} \quad (2)$$

Estudios han evidenciado que, a menor pH, la pectina se polimeriza, disminuye el ácido libre y aumenta el PE (Haque et al., 2025). Además de los factores mencionados anteriormente, se ha informado que, a mayor madurez del fruto, mayor es el PE de la pectina, debido al incremento de grupos ácidos esterificados (Hossain et al., 2024).

Un mayor peso equivalente en la pectina se asocia directamente con una mayor capacidad gelificante, debido a la formación de una red tridimensional más densa y estable, mejorando así la textura, firmeza y estabilidad del gel obtenido.

C. Contenido de metoxilo (MeO)

El contenido de metoxilo es un indicador importante del tiempo de fraguado, la fuerza del gel y capacidad de gelificación, así como su capacidad para unirse a iones metálicos (Hossain et al., 2024). En mercado se pueden encontrar pectinas de bajo metoxilo cuando MeO es <7%, y pectinas de alto metoxilo cuando MeO es >7% (Panwar et al., 2023). Cuando el contenido de MeO es mayor al 7%, las pectinas tienen la capacidad forma geles en presencia de azúcar y ácido, como en mermeladas y jaleas tradicionales. Por el contrario, si es menor al 7%,

indica que la pectina gelifica con la ayuda de sales de calcio, usada en productos con menos azúcar (Panwar et al., 2023).

Para determinar el contenido de metoxilo, se adiciona 25 mL de NaOH al 0,25 N a la solución neutralizada obtenida de la evaluación del peso equivalente. Antes de dejar reposar por 30 min, la mezcla es homogeneizada por completo. Finalmente, agregar 25 mL de HCl al 0,25 N y realizar la titulación con NaOH 0,1 N (Suleiman et al., 2025). Los valores del contenido de metoxilo son obtenidos mediante la ecuación 3.

$$MeO(\%) = \frac{\text{Volumen NaOH (mL)} * \text{Normalidad NaOH} * 3,1}{\text{Peso de la muestra (g)}} \quad (3)$$

Generalmente, las pectinas extraídas de fuentes cítricas se clasifican como de alto metoxilo. Por ejemplo, Yu et al. (2024) reportaron un contenido de metoxilo de 7,08% y 8,35% para pectina de cáscara de pomelo extraída mediante UAE y MAE, respectivamente. Asimismo, Vathsala et al. (2024) y Duggal et al. (2024), analizaron las pectinas cítricas comerciales y reportaron valores entre 7,13% y 9,30%, consecuentemente.

D. Grado de esterificación (DE)

El DE es una de las propiedades críticas que tiene interferencia en la capacidad de gelificación, emulsificación, estabilidad y solubilidad al momento de su aplicación en diferentes industrias (Bachari et al., 2024).

Según su DE, la pectina se clasifica en dos grupos: LMP (<50%) y HMP (>50%) (Tabla 1). La pectina HMP forma rápidamente un gel a altas temperaturas y bajo pH. Por el contrario, la pectina LMP forma geles rígidos por

reticulación con calcio o cationes multivalentes (Haque et al., 2025). Asimismo, HMP se puede convertir a LMP ya sea enzimáticamente (pectina metil esterasa) o por tratamiento alcalino (Sharma et al., 2025).

Los métodos más comunes para determinar el DE, son el método volumétrico y la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR). El primero implica la cuantificación de grupos carboxilo libres y esterificados mediante titulaciones ácido-base antes y después de la saponificación. Mientras que la FT-IR, utilizan la absorbancia de bandas específicas relacionadas con los grupos éster y carboxilo para determinar la DE (Yu et al., 2021).

La determinación del DE por el método de titulación; este método involucra hidratar 200 mg de pectina en 20 mL de agua destilada libre de CO₂ a 40 °C y 3 mL de etanol. La solución obtenida es titulada con NaOH al 0,1 N (V₁, mL) utilizando fenolftaleína como indicador del punto final. A continuación, añadir 10 mL de NaOH al 0.1 N y agitar por 15 min hasta intensificar el color rosado. Transcurrido este tiempo, añadir 10 mL de HCl 0.1 N y agitar hasta desaparecer el color rosa (Elik & Armağan, 2025). Por último, titular con NaOH al 0.1 N (V₂, mL); el DE es calculada utilizando la ecuación 4.

$$DE (\%) = \frac{V_2 (mL)}{V_2 (mL) + V_1 (mL)} \times 100 \quad (4)$$

Figura 4

Principales métodos para la determinación del grado de esterificación



Nota. La figura muestra de forma comparativa los métodos analíticos para determinar el DE, adaptado de Yu et al. (2021)

El valor de DE está influenciado por varios factores, incluyendo la concentración de ácido (pH), el tiempo de extracción y la temperatura. Por ejemplo, concentraciones más altas de ácido (pH bajo), tiempos de extracción prolongados y temperaturas elevadas tienden a promover el proceso de desesterificación, conllevando a una disminución en el valor de DE (Akachat et al., 2025).

E. Contenido de ácido galacturónico (GalA) y ácido anhidrourónico (AUA)

Tanto el GalA (Benmebarek et al., 2025) como el AUA (Hossain et al., 2024), se han utilizado para determinar la pureza de la pectina. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la pureza mínima aceptable para la pectina es superior al 65% de GalA (Benmebarek et al., 2025). De manera concordante, las directrices del Food Chemical Codex establecen que la pectina destinada a uso industrial debe contener un mínimo de 65 % de ácido anhidrourónico (Suleiman et al., 2025).

Para determinar la pureza de la pectina en función contenido de ácido galacturónico, en primer lugar, se prepara una solución de 0,1 mg/mL de pectina en agua destilada con agitación intensa en un tubo de ensayo con tapón. Posteriormente, se añade 6 mL de ácido sulfúrico (95-97%) y 20 µL de reactivo de etanol carbazol (0,1 % p/v) y dejar reposar durante 4 h. Finalmente tomar las absorbancias de las mezclas mediante un espectrofotómetro a 520 nm (Gonzalez et al., 2025).

$$AUA (\%) = \frac{\text{Masa del ácido galacturónico (ug)}}{\text{Masa de la pectina en la alicuota de 1 mL (ug)}} * 100 \quad (5)$$

Donde: La masa de ácido galacturónico se determina a partir de una curva de calibración estándar de ácido D-(+)-galacturónico

Por otro lado, el contenido de AUA en las pectinas se determina a partir de los valores obtenidos mediante titulación, utilizados tanto para el cálculo del peso equivalente como para el contenido de metoxilo, de acuerdo con la siguiente ecuación (Hossain et al., 2024):

$$AUA (\%) = \frac{176 \times 0.1z \times 100}{w \times 1000} + \frac{176 \times 0.1y \times 100}{w \times 1000} \quad (6)$$

Donde z: mL (titulación) de NaOH para la determinación del PE; y: mL (titulación) de NaOH para la determinación del MeO; w: Peso de la muestra

Estudios han demostrado que la pureza de la pectina se ve influenciada por las condiciones de extracción, incrementándose con la reducción del pH y con una mayor relación líquido/sólido (Gurev et al., 2023). Asimismo, la utilización de agentes de extracción ecológicos, como el ácido cítrico, favorece una mayor recuperación de ácido anhidrouónico; dando como resultado pectinas de mayor pureza (Mahmud et al., 2021).

F. Análisis por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La FT-IR es una herramienta invaluable para analizar la pectina, ya que permite identificar rápidamente los grupos funcionales y la estructura y, con ello, determinar su grado de esterificación, que es una de sus propiedades más importantes. Para el análisis, generalmente, se utilizan espectros FTIR con rango espectral de entre 4000–400 cm^{-1} , con resoluciones de 4 y 8 cm^{-1} y de 16 a 64 escaneos por muestra para asegurar una adecuada relación señal-ruido (Zhang et al., 2025).

G. Propiedades funcionales

La capacidad de retención de agua (CRA) es una característica fundamental de varios sistemas alimentarios y esta referida a la cantidad de agua que retiene una muestra/g (Wani & Patidar, 2025). Mientras que la capacidad de retención de aceite (OHC), cuantifica la cantidad de aceite adsorbido o retenido por la matriz polimérica. Esto es determinante para la funcionalidad de la pectina como agente estabilizante, emulsionante y sustituto de grasa en una amplia gama de aplicaciones alimentarias y no alimentarias (Panwar et al., 2023).

Para calcular la CRA y OHC, brevemente, se debe pesar 0,5 g de muestra de pectina directamente en un tubo de centrífuga de 30 mL y mezclar con 10 mL de agua destilada o aceite. La solución debe ser agitada fuertemente, luego dejar reposar durante 20 min a temperatura ambiente y posteriormente centrifugar a 4000 rpm durante 20 min. Antes de registrar el residuo, se debe eliminar el sobrenadante y los valores de CRA y OHC son calculados empleando las siguientes ecuaciones (Gonzalez et al., 2025).

$$CRA = \frac{\text{Peso del agua retenida}}{\text{Peso de la muestra}} \quad (7)$$

$$OHC = \frac{\text{Peso del aceite retenido}}{\text{Peso de la muestra}} \quad (8)$$

H. Propiedades emulsionantes

Para determinar la capacidad emulsionante (CE) y la estabilidad emulsionante (ES), se debe mezclar una solución de 10 mL de pectina al 1 % (p/v) con 5 mL de aceite de soja y agitar vigorosamente por 3 min. Las emulsiones resultantes son centrifugadas a una a 1000 rpm por 5 min (Wani & Patidar, 2025). Después de la centrifugación, se debe medir el volumen del sobrenadante para calcular la CE mediante la siguiente ecuación:

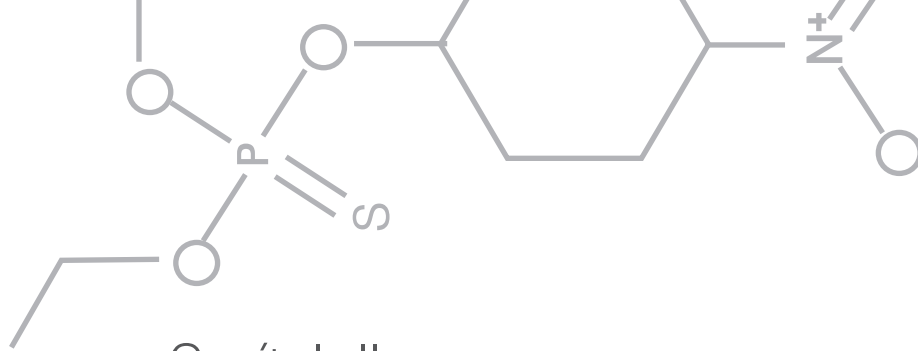
$$EC (\%) = \frac{V_f}{V_i} \quad (9)$$

Donde: V_f : Volumen de sobrenadante y V_i : Volumen inicial de la mezcla

Para la determinación de la ES, las emulsiones obtenidas son incubadas a 80 °C durante 30 min y centrifugadas a 948 rpm por 5 min. La estabilidad emulsionante es determinada utilizando la ecuación 9.

$$ES (\%) = \frac{V_t}{V_i} \quad (10)$$

Donde: V_t : Volumen de la emulsión después de la incubación y centrifugación y V_i : Volumen inicial de la mezcla



Capítulo II

Métodos de extracción de la pectina

2.1. Generalidades

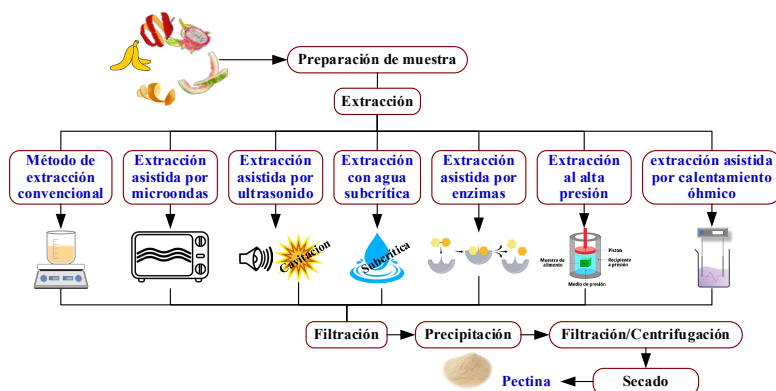
Las sustancias pécticas han sido clasificadas por la American Chemical Society en cuatro tipos diferentes: protopectina (forma insoluble y precursora de la pectina soluble), ácido péctico, ácido pectínico y pectina. Dentro de los tejidos vegetales de las frutas y vegetales, la pectina se presenta predominantemente como protopectina, un polisacárido insoluble en agua (Chandel et al., 2022). No obstante, la protopectina puede transformarse en pectina soluble mediante soluciones de ácidos conocidos como quelantes (ácidos orgánicos o inorgánicos), las cuales hidrolizan enlaces que mantienen la protopectina unida a la pared celular; esto, sumado a los distintos métodos físicos, químicos y biológicos, libera la pectina como una molécula soluble que puede ser dispersada en el medio de extracción (Yi et al., 2024). La posterior separación y purificación produce pectina de alta calidad.

Las técnicas de extracción de pectina se pueden dividir en dos categorías: técnicas tradicionales y técnicas ecológicas no convencionales emergentes (Figura 2). Durante la extracción, es muy importante controlar varias variables como: la relación entre sólido y líquido, el pH, el tiempo, la temperatura, la potencia, la amplitud, la frecuencia (dependiendo del método utilizado) y el tipo de

agente acidulante (ácidos orgánicos o inorgánicos) (Roman et al., 2023). Estas variables no solo afectan el rendimiento de la pectina, sino también sus propiedades fisicoquímicas, funcionales y emulsificantes, así como en su potencial aplicabilidad.

Figura 5

Principales métodos de extracción de pectina



2.2.Preparación de muestra

Normalmente, se requiere el preprocesamiento de los residuos agroindustriales antes de la extracción de pectina. En primer lugar, el material vegetal destinado a la extracción debe lavarse con agua potable o destilada para remover impurezas superficiales. Posterior a ello, se recomienda secar el material vegetal, ya que el exceso de agua podría reducir la concentración del disolvente y, por consiguiente, la eficiencia de la extracción. Y finalmente, las muestras secas deben ser molidas; esto permitirá aumentar la superficie de extracción (Roman et al., 2023).

2.3.Extracción convencional

Los procesos estándar de extracción de pectina involucran el calentamiento con ácidos minerales o inorgánicos que actúan como catalizadores para ayudar a solubilizar la protopectina y liberar al medio de extracción. Según Haque et al. (2025), la extracción convencional de pectina involucra tres etapas principales: En primer lugar, se debe realizar un pretratamiento (lavado, secado y molienda) con el fin de impedir que la pectina se degrade inactivando enzimas o microorganismos y creando una materia prima estable. La segunda etapa es la extracción de pectina, que requiere un ácido mineral fuerte con una temperatura que oscila entre 75 y 100 °C y un y el tiempo de reacción que puede variar entre 1 y 3 h para solubilizar la protopectina. El tercer paso, conocido como posextracción, implica filtrar, concentrar y precipitar la solución de pectina filtrada añadiendo etanol.

Si bien la extracción ácida convencional está bien establecida y escalada, se necesitan pH bajo, temperatura alta y tiempos de tratamiento prolongados para obtener un rendimiento de pectina deseable, esto resulta en algunas desventajas como la despolimerización térmica, el alto consumo de energía, la corrosión de los equipos y la contaminación ambiental (Durga et al., 2025). Los problemas ambientales están principalmente asociados con la utilización de ácidos inorgánicos como el ácido sulfúrico, clorhídrico y el nítrico, los cuales generan grandes cantidades de aguas residuales contaminadas (Riyamol et al., 2023).

Tabla 3
Comparación de extracción convencional con métodos emergentes

Material vegetal	Método de extracción	Condiciones y parámetros optimizados de la pectina extraída					Y	DE	GalA / AUA	Autor
		Tiempo	T°	Tipo de ácido/ pH	SLR (g/mL)	Amplitud (%) / Presión (MPa) / Potencia (W) / Voltaje (V/cm)				
Pulpa de Gac	UAE	35 min	60 °C	C ₆ H ₈ O ₇ /1,5	1:50	80%	53,80 %	8,48%	–	(Tran et al., 2021)
	EC	100 min	90 °C	C ₆ H ₈ O ₇ /1,5	1:50	–	42,97 %	10,29%	–	
Pulpa de zanahoria (Daucus carota)	UAE	11,2 min	80 °C	HNO ₃ /1,2	1:80	100%	57,2 %	56,7%	76,3%	(De Laet et al., 2024)
	EC	60 min	80 °C	HNO ₃ /1,6	1:67	–	41,2%	63,3%	75,8%	
Cáscaras de maracuyá	MAE	12 min	75 °C	C ₆ H ₈ O ₇ /2,9	1:56	183 W	18,73%	53,27	71,39%	(Thu Dao et al., 2021)
	EC	90 min	75 °C	C ₆ H ₈ O ₇ /2	1:50	–	13,18	61,98%	66,27%	
Pulpa de zanahoria negra	MAE	6,43 min	30 °C	HCl/1,7	1:15	79 W	26,29 %	45,2%	72,3%	(Elik & Armağan, 2025)
	EC	90 min	90 °C	HCl/1,5	1:50	–	23,77%	47,5%	61,34%	
Cáscara de pomelo	MAE	9 min	–	C ₆ H ₈ O ₇ /2	1:30	600 W	26,63%	25%	46%	(Hossain et al., 2024)
	EC	120 min	90°C	C ₆ H ₈ O ₇ /2	1:30	–	16,49%	68,94%	82,72%	
Cáscara de granada	OHAE	18 min	–	HCl/1,5	1:40	10 V/cm	8,16 %	70,78%	82,86%	(Sharifi et al., 2022)
	EC	80 min	86°C	HCl/1,5	1:50	–	8,93%	67,17	73,84%	

Nota. EC: extracción acida convencional, MAE: extracción asistida por microondas, UAE: extracción asistida por ultrasonido, OHAE: extracción asistida por calentamiento óhmico

Para superar los inconvenientes asociados con el uso de ácidos minerales, los ácidos orgánicos como el cítrico, acético, málico y tartárico están siendo explorados como un sustituto respetuoso el entorno ambiental debido a su naturaleza de grado alimenticio y fuente renovable (Íñiguez et al., 2024). No obstante, las altas temperaturas, tiempos prolongados y el alto consumo energético, no son remediados con el cambio de ácidos. Para hacer frente a estas limitaciones han surgido los métodos ecológicos no convencionales emergentes (Hossain et al., 2024).

2.4.Extracción mediante tecnologías emergentes

Para abordar las desventajas de la extracción ácida convencional, se han introducido diferentes métodos ecológicos y emergentes como la extracción asistida por enzimas, microondas, ultrasonido, calentamiento óhmico, alta presión y agua subcrítica para mejorar la recuperación de pectina (Hossain et al., 2024).

Tabla 4
Métodos verdes y emergentes de extracción de pectina, condiciones y parámetros optimizados

Método de extracción	Material vegetal	Condiciones y parámetros optimizados de la pectina extraída					Y	DE	Gala / AUA	Autor
		Tiempo	T°	Tipo de ácido/ pH	SLR (g/mL)	Amplitud (%) / Presión (MPa) / Potencia (W) / Voltaje (V/cm) / enzima (40 µL/g enzima comercial Celluclast® 1.5)				
EAE	cáscaras de mazorca de cacao	18,54 h	50 °C	Citrato de sodio 50 mM/4,6	–	40 µL/g enzima comercial Celluclast® 1.5	10,20%	–	52,06%	(Hennessey et al., 2021)
MAE	Cáscaras de maracuyá	12 min	75 °C	C ₆ H ₈ O ₇ /2,9	1:56	183 W	18,73%	53,27	71,39%	(Thu Dao et al., 2021)
	Trapos de yaca	10,56 min	66 °C	C ₆ H ₈ O ₇ / 1,35	1: 24,87	50 W	29,59%	64,61%	61,53%	(Tran et al., 2023)
	Cáscaras de Citrus reticulata	10 min	110 °C	ácido acético /2,2	1:100	Pulsos de 10/10 s	8.35%	66,67 %	63,15 %	(Duggal et al., 2024)
	Cáscaras de nuez	16 min	74 °C	C ₆ H ₈ O ₇	1:25	400 W	34,13%	59,88%	76,03	(Sindhu et al., 2024)
	cáscaras de limón	4 min		C ₆ H ₈ O ₇ / 1	1:30	450 W	41,4 %	>80%	68,7%	(Pei et al., 2024)
	Cáscara de limón	35,5 s	–	C ₆ H ₈ O ₇ /1,9	1:15	769 W	47,5 %)	41,5%	–	(Wani & Patidar, 2025)
UAE	pieles de tomate	8 min	60 °C	HCl/1,5	–	600W	15,21%	66,43%	82,5%	(Sengar et al., 2020)
	Cáscaras de citrus limetta	24 min	40 °C	C ₆ H ₈ O ₇ /1,9	1:30	37%	28,82 %	55,29%	73,33%	(Panwar et al., 2023)
	cáscaras de lima dulce	9,38 min	<40 °C	HCl/2	1:46,8	44,01%	26,35%	22,14%	69,11%	(Vathsala et al., 2024)
	cáscaras de limón	60 min	55 °C	C ₆ H ₈ O ₇ /1	1:30	–	37,9 %	86,8%	78,6%	(Pei et al., 2024)
	Cáscara de pomelo	30 min	70 °C	C ₆ H ₈ O ₇ /2	1:30	100 W	21,13%	65,96	72,04%	(Hossain et al., 2024)
	Cáscaras de lima dulce	34,55 min	25 °C	Cloruro de colina y C ₆ H ₈ O ₇	1:30	60%	37,21%	85,49%	–	(Rai et al., 2025)
SWE	cáscara de caqui	2,84 min	138 °C	Agua + N ₂	1:10		7,62%	40,61%	64,03%	(Cui et al., 2022)
	cáscara de la mazorca de cacao	10 min	120 °C	–	1:15		6,58%	37,87	66,53	(Anoraga et al., 2024)
	Cáscaras de maracuyá	30 min	120 °C	–	1:30	10 MPa	15,7 %	>50%	78 %	(Pereira et al., 2024)
	Corteza de durían	18,5 min	120 °C	–	1:15	–	5.89%	71,78 %	68,17%	(Suleiman et al., 2025)
OHAE	Cáscara de limón	58,4 min	–	C ₆ H ₈ O ₇ /2	1:8,7	14,2 V/cm	16,58%	57,55%	69,38%	(Tunç & Odabaş, 2021)
	cáscara de granada	18 min	–	HCl/1,5	1:40	10 V/cm	8,16 %	70,78%	82,86%	(Sharifi et al., 2022)
	Pulpa de manzana	102 min	93 °C	C ₆ H ₈ O ₇ /2	1:50	14 V/cm	25,02%	65,56%	55,87%	(Wang et al., 2025)

Nota: EAE: Extracción asistida por enzimas, UAE: Extracción asistida por ultrasonido, Extracción asistida por microondas, SWE: Extracción con agua subcrítica, OHAE: Extracción asistida por calentamiento óhmico

En diversos artículos publicados en los últimos años, se informa que los nuevos métodos de extracción de pectina presentan potencial para (Mao et al., 2023):

- Extraer pectina sin dañar las cadenas laterales neutrales, aumentando así las aplicaciones potenciales (por ejemplo, ingredientes alimentarios funcionales y medicamentos).
- Reducir el impacto ambiental mediante un menor consumo de energía, disolventes menos tóxicos y menores requisitos de disolventes.
- Extraer pectina de una gama más amplia de materias primas de biomasa (es decir, alimentos, desechos agrícolas y coproductos).

Asimismo, en la mayoría de los métodos emergentes (Tabla 1), están optando por utilizar ácidos orgánicos como el ácido cítrico. Un ácido orgánico débil que posee buenas propiedades de quelación; esto permite mejorar la solubilidad de la protopectina, conducir a mayores rendimientos de extracción y menor degradación de la pectina en comparación con los ácidos inorgánicos (Anoraga et al., 2024)

2.4.1. Extracción asistida por enzimas (EAE)

El principio de la extracción asistida por enzimas es el uso de enzimas para romper la matriz de la pared celular y liberar la pectina (Resende & Franca, 2022). Las enzimas involucradas en la extracción asistida por enzimas incluyen: la celulosa, hemicelulasa, xilanas, pectinasa, α -amilasa, β -glucanasa, endopoligalacturonas y mezclas comerciales de múltiples enzimas que no solo permiten incrementar el rendimiento, sino también la calidad de la pectina (Roman et al., 2023).

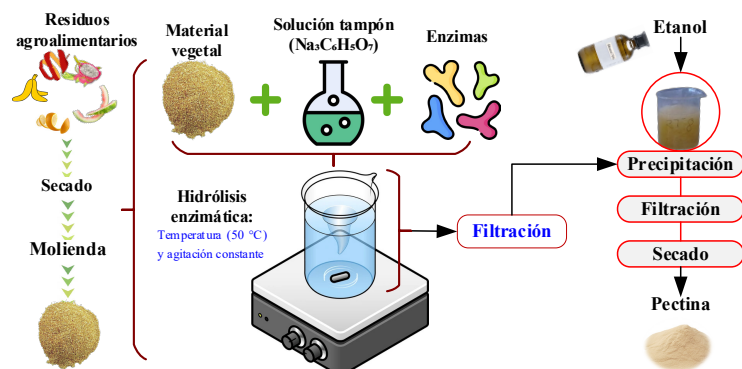
Según (Haque et al., 2025), el mecanismo de la extracción asistida por enzimas en la extracción de pectina es el siguiente:

- El material vegetal es sometido a un tratamiento enzimático bajo condiciones controladas de pH, temperatura y tiempo para maximizar la actividad enzimática.
- En el caso de la pectina, enzimas como pectinasa, celulasa entre otras hidrolizan los polisacáridos de la pared celular (celulosa, hemicelulosa y protopectina).
- Esta degradación rompe la matriz estructural que retiene a la pectina, facilitando la penetración del solvente.
- Finalmente, la pectina soluble es liberada de manera más eficiente hacia el medio de extracción.

La Figura 6 resume el proceso de obtención de pectina mediante extracción asistida por enzimas. El procedimiento general implica la adición de una solución tampón enzimática a la materia prima previamente molida, extracción mediante hidrólisis enzimática en un baño de agua a temperatura y agitación constante, seguida de la precipitación con etanol, la filtración, la separación, el secado y la pulverización para obtener el producto final de pectina (Dang et al., 2025).

Figura 6

Esquema general de la extracción asistida por enzimas



El tipo de enzima, así como una combinación, tiene un efecto significativo en el rendimiento de extracción. De Laet et al. (2025) investigaron el efecto de la enzima celulosa (C) y hemicelulasa (HC) durante la EAE de pectina de pulpa de zanahoria. investigaron el efecto de la enzima celulosa (C) y hemicelulasa (HC) durante la EAE de pectina de pulpa de zanahoria. Para la extracción, hidrataron 3 g de pulpa de zanahoria molida en 200 mL de una solución de acetato de sodio (100 mM) a pH 5. Las muestras se colocaron en un baño de agua con agitación y precalentaron a 50 °C; después de ello, se añadieron las diferentes enzimas (celulosa (C), hemicelulasa (HC) y celulosa + hemicelulasa (C + HC)) en una concentración enzimática de 100 U/g de biomasa seca para cada enzima, y el proceso de extracción se realizó durante 24 h a 50 °C. Transcurrido el tiempo, se compararon las pectinas extraídas con C, HC y C + HC y las pectinas extraídas con C, HC y C + HC más tratamiento térmico de 5 min a 80 °C. A partir de esta configuración experimental, los investigadores concluyeron que EAE con C y la combinación de ambas enzimas, C + HC, resultó en el mayor rendimiento de extracción de pectina. Además, la adición de tratamiento térmico (5 min a 80 °C) resultó, para todos los tratamientos (C, HC y C + HC), en

un rendimiento de extracción de pectina significativamente mayor. Esto está asociado a que las temperaturas elevadas durante el tratamiento térmico causaron la solubilización de una cantidad adicional de pectina, que era potencialmente más accesible debido a la acción de las enzimas.

Hennessey et al. (2021) utilizaron un diseño central compuesto para optimizar la concentración de materia prima (%), dosis de enzima ($\mu\text{L/g}$) y el tiempo (h) en la extracción cáscaras de mazorcas de cacao empleando Celluclast® 1.5 como enzima. Se estudiaron tres variables dependientes: rendimiento de pectina, contenido de GalA y rendimiento de GalA ($\text{g}/100 \text{ g}$ de materia prima). Los parámetros óptimos fueron una concentración de materia prima del 6,0 %, $40 \mu\text{L g}^{-1}$ de enzima y 18,54 h, condiciones que produjeron un rendimiento de pectina del 10,20%, 52,06% de GalA y un rendimiento de 5,31 g de GalA/100 g de materia prima. El rendimiento obtenido mediante EAE (10,20%) fue mayor que la EC y UAE con valores del 8,08 y 8,28%, respectivamente. Los autores reportaron que el rendimiento de pectina se incrementó al aumentar la concentración enzimática y el tiempo de reacción. En particular, Celluclast® 1.5 mostró requerir periodos prolongados para hidrolizar la celulosa de la pared celular y liberar la pectina de manera eficiente.

Wang et al. (2024) buscaron extraer pectina de pulpa de feijoa mediante extracción asistida por enzimas. Prepararon una mezcla 10 g de polvo de pulpa de feijoa en 150 mL de tampón de citrato de sodio (50 mmol/L)/ácido cítrico con un pH de 6,5 y añadieron 25 mg de celulosa (enzima) a la mezcla para realizar hidrólisis enzimática durante 97 min a 50 °C con agitación constante. Transcurrido el tiempo inactivaron la celulosa mediante calor a 90 °C durante 10 min. Los resultados indicaron un rendimiento del 9,26%, DE 68,43%, GalA

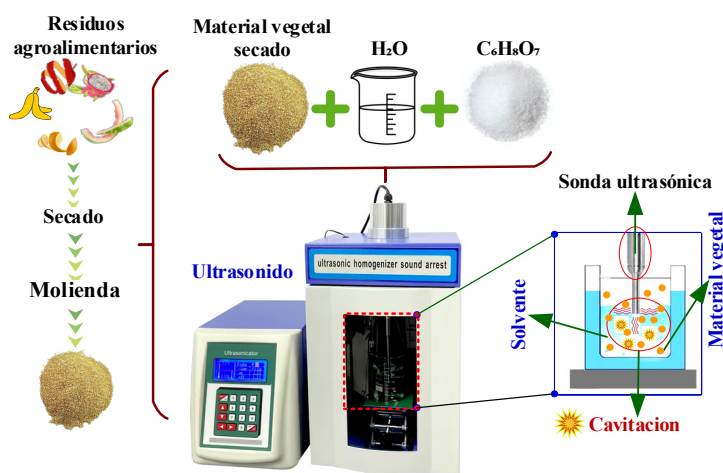
30,05%. En términos de rendimiento la EAE fue mayor a la EC (7,64), esto puede deberse a la rotura e hidrólisis de la pared celular causada por las enzimas, que permitieron una interacción más efectiva entre los materiales vegetales y los solventes de extracción.

2.4.2. Extracción asistida por ultrasonido (UAE)

La UAE es una tecnología basada en la aplicación de ondas sonoras de alta frecuencia que van desde 20 a 100 kHz a un medio líquido que contiene el material vegetal (Singhal & Swami, 2022). Estas ondas generan un fenómeno llamado cavitación acústica (formación y colapso de microburbujas). El colapso de las microburbujas genera un aumento localizado de la presión y temperatura (Dixit et al., 2025), provocando una disrupción de las paredes celulares del material vegetal. Esto permite una mayor penetración del solvente en la matriz celular, facilitando la liberación de la pectina y otros compuestos intracelulares al medio de extracción (de Souza et al., 2025).

Figura 7

Representación gráfica la extracción asistida por ultrasonido

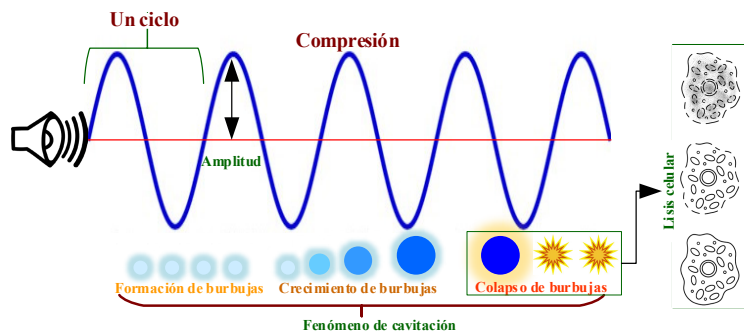


De manera más detallada, durante la extracción asistida por ultrasonido se desarrolla de la siguiente manera (Ha-que et al., 2025):

- a. A medida que las ondas ultrasónicas viajan a través de un líquido, producen ciclos alternados de compresión (alta presión) y rarefacción (baja presión). La fase de baja presión del líquido es cuando se forman burbujas (son pequeños orificios llenos de vapor); mientras que, al aumentar la presión, estas burbujas estallan repentinamente y causan lisis celular debido a las presiones concentradas del colapso.
- b. La energía producida durante la cavitación (formación y colapso de microburbujas) provoca la lisis de las paredes celulares del material vegetal. Al romperse la pared celular, el disolvente penetra con mayor facilidad en el material, mejorando el contacto y la interacción entre este y la molécula objetivo y facilitando la extracción del componente de interés (pectina).
- c. Finalmente, la cavitación produce un calentamiento localizado; esto aumenta la solubilidad de algunas sustancias. Por ejemplo, durante la extracción de pectina, este calentamiento acelera la rehidratación de materiales secos, impulsando la penetración del solvente y disociando mejor a la protopectina.

Figura 8

Diagrama general del fenómeno de cavitación acústica durante la UAE



Se ha documentado que el tipo de material utilizado, pH, temperatura, así como la frecuencia, amplitud, potencia y tiempo de sonicación, influyen significativamente en el rendimiento de la extracción de pectina. Rai et al. (2025) indicaron que, durante la UAE, al aumentar la amplitud de 45% a 60%, incrementó el rendimiento al 27,65 % y al 34,12 %, respectivamente. No obstante, una alta amplitud (90%) provocó una caída en el rendimiento (29,71%). Esta disminución en el rendimiento de pectina se puede atribuir a la creciente intensidad de la ultrasonificación, que provoca la rotura de la cadena polimérica y la degradación del exoesqueleto de pectina debido a la implosión asimétrica de la burbuja y la formación de microchorros. Por su parte, Panwar et al. (2023) optimizaron mediante el diseño Box-Behnken la extracción de pectina de cáscaras de Citrus limetta y obtuvieron un rendimiento máximo del 28,82 % en condiciones óptimas de 40 °C de temperatura, 37 % de amplitud, 1,9 pH y 24 min de sonicación. Asimismo, indicaron que utilizar una amplitud ultrasónica elevada disminuye la eficiencia de cavitación, debido al colapso asimétrico turbulento de las burbujas; esto, a su vez, reduce la transmisión de energía y, en conse-

cuencia, disminuye el rendimiento de extracción de pectina. Estos estudios evidencian que se deben utilizar amplitudes inferiores al 60% para maximizar el rendimiento de extracción de pectina.

Además, Tran et al. (2021) reportaron que las condiciones óptimas para la recuperación de pectina de pulpa de Gac utilizando UAE fueron un tiempo de extracción de 35 min, un pH de 1,5 y una potencia ultrasónica de 200 W. Concluyeron que el pH fue el factor más influyente, evidenciándose que el rendimiento de extracción y el grado de esterificación aumentaron cuando el pH disminuyó de 3,5 a 1,5.

Finalmente, Wani y Uppaluri (2023) documentaron que la UAE permite obtener pectina de mayor pureza. En su estudio sobre extracción de pectina de cáscara de pomelo mediante extracción asistida por ultrasonido pulsado, obtuvieron un contenido de GalA del 65,5%, mientras que con el método de extracción ácido convencional, el valor de GalA solo fue 52%. Esto posiblemente se deba a que el proceso EC, al estar basado en la aplicación de calor, provocó la degradación parcial de las cadenas de pectina, lo que redujo significativamente el contenido de ácido galacturónico en la muestra.

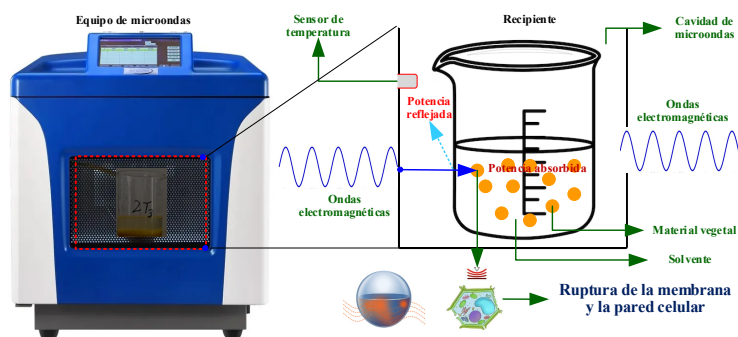
2.4.3. Extracción asistida por microondas (MAE)

La extracción asistida por microondas (MAE) es un método utiliza ondas electromagnéticas desde un punto de extensión de 0,3 GHz a 300 GHz, que interactúan utilizando compuestos (polares) (Rawat et al., 2024). En la MAE, el mecanismo de acción implica la absorción de la radiación de microondas por moléculas polares del solvente como de las células del tejido vegetal, esto provoca un rápido aumento de la temperatura celular. A medida

que el líquido del tejido celular se vaporiza, crea una presión de vapor que rompe la membrana y la pared celular, facilitando la liberación de sustancias intracelulares al fluido de extracción (Dang et al., 2025).

Figura 9

Principales componentes de extracción de pectina asistida por microondas



Asimismo, Haque et al. (2025) indican que la extracción asistida por microondas se desarrolla de la siguiente manera:

- a. Cuando se someten a la radiación electromagnética de microondas, las moléculas polares, como el agua, vibran rápidamente y producen calor dentro de la muestra.
- b. La presión generada por el rápido calentamiento y la evaporación del agua intracelular conduce a la ruptura celular y a una mayor liberación de moléculas objetivo como la pectina.
- c. La acción combinada del calor y el solvente incrementa la solubilidad de la pectina y facilita su difusión

desde la matriz vegetal hacia el medio de extracción, favoreciendo la eficiencia del proceso.

- d. El calentamiento rápido y la transferencia de energía eficaz dan como resultado un tiempo de extracción corto.

Wani & Patidar (2025) estudiaron los efectos de varias variables de entrada de procesamiento (potencia de microondas 360–900 W, tiempo de irradiación 20–80 s y pH 1–3,5 a una relación de carga fija 1:15 g/mL) sobre el rendimiento de pectina de cáscara de limón. Mediante un diseño de superficie de respuesta indicaron que el máximo rendimiento logrado (47,3%) fue al emplear 900 W, 80 s, y un pH de 1. No obstante, obtuvieron un DE bajo (41,5%), dado que emplear potencias elevadas pueden romper los enlaces éster metílicos de la pectina, provocando desmetilación, por tanto, reduciendo el grado de esterificación.

El apartado mencionado anteriormente ha sido documentado en la literatura científica, en donde se indica que aumentar la potencia inicialmente incrementa el rendimiento de la extracción; sin embargo, utilizar potencias por encima de 650 W afecta no solo al rendimiento, sino también a la calidad de la pectina (Mao et al., 2023). 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 (41,4%) 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%.

La MAE es un método emergente para la extracción de pectina que contribuye a una reducción del tiempo de extracción, aumento significativo del rendimiento, menor consumo energético y menor utilización de disolventes inorgánicos (Dang et al., 2025). Golub et al. (2025) lograron extraer pectina de pulpa de tomate a condiciones óptimas de microondas de 11,66 min/600 W/pH 1, obteniendo dos veces más pectina que la extracción convencional durante 2 h/85 °C/pH 1,5. Por su parte, Costa et al. (2025) reportaron que el rendimiento de pectina de pulpa de manzana obtenida mediante extracción asistida por microondas durante 5 minutos fue equivalente a 90 minutos de calentamiento convencional. Asimismo, indicaron que el control de temperatura en el microondas produjo un bajo consumo de energía y un alto rendimiento de extracción. Además, concluyeron que la pectina extraída mediante microondas mostró propiedades relativamente similares a las comerciales.

Finalmente, es importante indicar que la relación sólido/líquido (SLR) juega un papel importante en el rendimiento de extracción mediante MAE. Rodsamran y Sothornvit (2019) reportaron mayor rendimiento de pectina de cáscara de lima al utilizar una SLR de 1:40 g/mL en comparación con la de 1:20 g/mL. Esto concuerda con las expectativas para la extracción convencional, donde un mayor volumen de solvente en comparación con el sólido incrementa el rendimiento de extracción en equilibrio al incrementar la fuerza impulsora para la transferencia de masa a través del potencial osmótico (Mao et al., 2023).

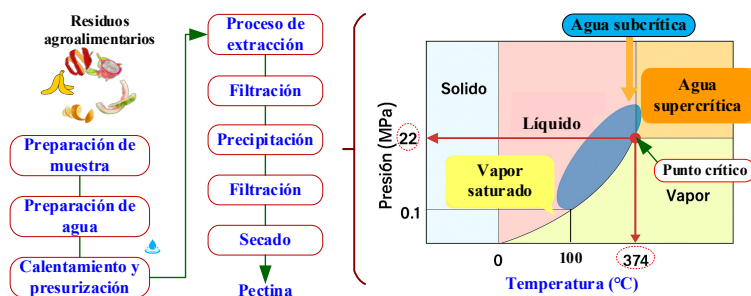
2.4.4. Extracción con agua subcrítica (SWE)

La extracción con agua subcrítica (SWE) está emergiendo como una técnica ecológica, libre de ácidos, ya que utiliza agua como medio de extracción, un disolvente no tóxico, no inflamable y respetuoso con el medio ambiente, y no produce gases de efecto invernadero ni residuos (Cui et al., 2022). La extracción con SWE opera a temperaturas inferiores al punto crítico (374 °C) y superiores al punto de ebullición (100 °C) del agua, y a presiones en el rango de 2–22 MPa, asegurando así que el solvente permanezca en estado líquido incluso a altas temperaturas (Benito et al., 2024).

El agua subcrítica actúa como un medio hidrolítico que descompone la matriz de la planta y facilita la liberación de fracciones ricas en pectina. De acuerdo con Haque et al. (2025), el SCW suele seguir el siguiente mecanismo de extracción (Figura 10):

Figura 10

Representación esquemática de la técnica de extracción con agua subcrítica



- El agua se calienta a temperaturas subcríticas (100–374 °C) mientras está bajo presión (0.1–22 MPa) para evitar su ebullición.

- A temperaturas subcríticas, la disminución de la constante dieléctrica del agua incrementa su capacidad para solubilizar compuestos apolares, esto amplía su selectividad como solvente y permite la extracción simultánea de compuestos polares, como la pectina, y apolares.
- A temperaturas elevadas, diversos compuestos aumentan su solubilidad, favoreciendo la transferencia de masa desde la matriz sólida hacia el solvente.
- Finalmente, el efecto combinado de calor y presión debilita las paredes celulares y facilita la liberación de la pectina y otros compuestos.

Cuando la temperatura y la presión cambian, las propiedades fisicoquímicas (especialmente la constante dieléctrica) del agua también tienden a cambiar, permitiendo la extracción selectiva de compuestos polares, de polaridad media, de polaridad débil y apolares. Es importante destacar que la temperatura es el parámetro más importante en el proceso de extracción de SWE; no obstante, la presión debe ser lo suficientemente alta como para mantener el agua en estado líquido (sin llegar a ebulir) (Brezo et al., 2023).

Para optimizar el proceso de extracción de pectina mediante SWE, es importante destacar que las principales variables de la extracción con agua subcrítica son la temperatura del agua subcrítica, la presión de operación, la relación sólido:líquido (SLR) y la duración del proceso de extracción. La mayoría de los procesos de extracción mantienen la temperatura o la presión constantes, mientras que varían el otro parámetro (Basak & Annappure, 2022).

Peighambardoust et al. (2021) optimizaron las condiciones de extracción de pectina de remolacha mediante CE y SWE. Las condiciones óptimas de CE fueron la temperatura de 90 °C, tiempo de 240 min, pH de 1, mientras que con SWE fueron una SLR de 1:30, temperatura de 130 °C durante 20 min manteniendo constante una presión de 5 MPa. La SWE fue más eficiente que el método CE, reportando los mismos rendimientos de extracción (SWE = 20,65 % vs. CE = 20,38 %) en un tiempo mucho más corto (SWE = 20 min vs. CE = 240 min); es decir, la SWE fue casi 12 veces más rápida que el método CE. Asimismo, los contenidos de GalA, DE y contenido de ácido ferúlico fueron mayores en la pectina extraída por SWE en comparación con la CE. El factor más influyente en la SWE fue temperatura, dado que el rendimiento de pectina aumentó significativamente cuando aumentó la temperatura de extracción. Esto podría atribuirse a la constante dieléctrica más baja del agua, que favorece la disolución de la pectina en agua.

Cui et al., 2022) estudiaron la extracción de pectina de cáscara de caqui extraída con SWE evaluando variables como: temperatura (120–160 °C), tiempo (1–5 min) y relación S:W (1:5–1:15) para recuperar la mayor cantidad de pectina. El rendimiento óptimo (7,62%) se encontró a 138 °C, 2,84 min y una relación líquido-sólido de 1:10,02, proporcionando un grado de esterificación de 40,61% y contenido de AUA del 64,03%. Además, el estudio identificó que la interacción entre temperatura y tiempo fue la más significativa en rendimiento, un aumento de estas variables, produjo mayor pectina; no obstante, un tiempo por encima de 3 min no incrementó el rendimiento.

Anoraga et al. (2024) aplicaron un diseño Box-Behnken

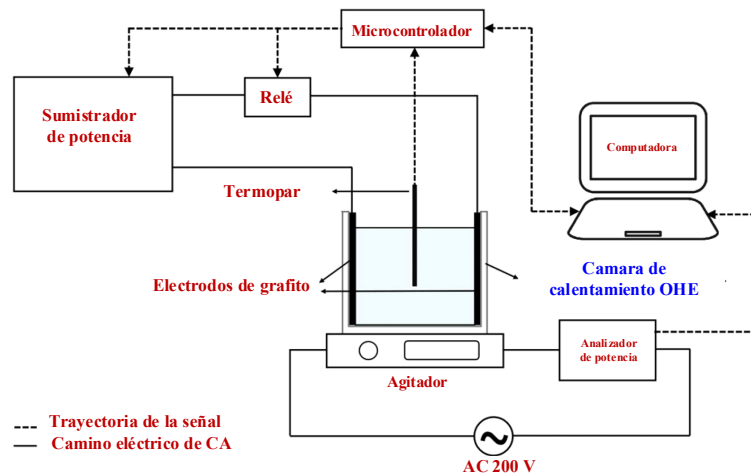
para optimizar SWE y examinar la influencia de la temperatura (100 °C–120 °C), tiempo de extracción (10–30 min) y la relación SLR (1:30–2:30 g/mL), en el rendimiento de pectina. El rendimiento máximo de pectina (6,58%) se obtuvo a 120 °C durante 10 min con 1:15 g/mL SLR. En comparación con la CE, la SWE generó un mayor rendimiento, DE (37,87%), contenido de metoxilo (3,92%) y valor AUA (66,53%). Se observó que tiempos prolongados y bajas temperaturas favorecieron un mayor rendimiento al facilitar el ablandamiento y liberación de la red de ácido galacturónico, mientras que temperaturas superiores a 120 °C provocaron degradación y disminución del rendimiento. Asimismo, un aumento de la SLR y la temperatura mejoró la solubilización de la pectina debido a la mayor superficie de contacto y a la hinchazón de las paredes celulares, que favorece la difusión y ruptura de enlaces. Finalmente, se encontró que la interacción entre tiempo y SLR fue significativa ($p < 0,05$): tiempos largos y mayor solvente incrementaron el rendimiento, aunque un exceso de solvente puede generar barreras en etapas posteriores del proceso.

2.4.5. Extracción asistida por calentamiento óhmico (OHAE)

La OHAE es una técnica de calentamiento que aprovecha la impedancia eléctrica inherente al alimento para producir calor, asegurando un calentamiento rápido, uniforme y eficiente que minimiza la degradación térmica de la pectina (Rawat et al., 2024). La OHAE está basada en la aplicación de una corriente eléctrica genera calor dentro de la muestra, esto genera la ruptura de la pared celular y mejora la solubilidad de los compuestos de interés (pectina) (Haque et al. (2025).

Figura 11

Diagrama esquemático de un sistema OHAE



Nota. La imagen muestra un sistema de OHAE, el cual está compuesto principalmente por una fuente de alimentación con varios voltajes de CA, cámara de calentamiento (hecha de vidrio), agitador magnético (utilizado para evitar la aglomeración del material durante todo el proceso de OHAE), termopar (para detectar la temperatura durante el proceso de extracción), microprocesador, analizador de potencia digital (utilizado para medir el consumo de energía del agitador), computadora y electrodos de grafito (Wang et al., 2025).

Las ventajas de la extracción asistida óhmica en comparación a la extracción convencional incluyen alta eficiencia energética, corto período de procesamiento, alto rendimiento de extracción y mejor calidad de la pectina extraída (Talha et al., 2024). Sin embargo, la implementación de OHAE aún presenta importantes desafíos. Entre ellos destacan la elevada inversión inicial en equipos especializados y las dificultades asociadas a su escalabilidad industrial, ya que mantener un calentamiento uniforme en grandes volúmenes resulta técnicamente complejo. A ello se suma la necesidad de optimizar parámetros eléctricos (voltaje y corriente) para evitar sobrecalentamiento localizado y degradación de la pectina (Haque et al., 2025).

A pesar de los desafíos anteriores, Wang et al. (2025) lograron optimizar la extracción por calentamiento óhmico

de pectina del orujo de manzana. Las mejores condiciones para OHAE fueron un gradiente de voltaje de 14 V/cm, un tiempo de 102 minutos y una temperatura de 93 °C, obteniendo un rendimiento del 25,02%, un DE del 65,56% y un contenido de GalA del 55,87%. En comparación con CE, OHAE proporcionó un aumento del 19,87 % en rendimiento de pectina y una reducción del 37,53 % en el consumo de energía.

Por otra parte, Sharifi et al. (2022) estudiaron los efectos del gradiente de voltaje y el tiempo, durante el calentamiento óhmico sobre el rendimiento y el ácido galacturónico de la pectina de cascara de granada. Mediante la metodología de superficie de respuesta indicaron que las condiciones óptimas fueron 10 V/cm para el gradiente de voltaje durante 18 min, Bajo estas condiciones el rendimiento de extracción y el contenido de GalA fueron de 8,16% y 82,86%, respectivamente. Los autores concluyeron que el método de calentamiento óhmico es un método más rápido para la extracción de pectina en comparación con el método ácido convencional (18 min frente a 80 min). Además, evidenciaron que, en tamaños de cáscara de granada más grandes, el calentamiento óhmico tiene un mayor rendimiento de extracción que el método convencional. Finalmente, indicaron que la gradiente de voltaje fue el factor más significativo para el rendimiento de pectina, mientras que el tiempo fue el factor más importante que afectó el contenido de GalA.

Finalmente Tunç y Odabaş (2021) se propusieron recuperar en un solo paso pectina y aceite esencial de residuos de limón mediante extracción/hidrodestilación asistida por calentamiento óhmico (OHAE/H). Los investigadores determinaron que una SLR de 1:8,7, un gradiente de voltaje de 14,2 V/cm durante 58 min, permitieron en-

contrar rendimiento del 16,58 y 3,62 para pectina y aceite esencial, respectivamente. Además, la pectina extraída por OHAE/H presentó 69,38 de GalA y 57,55% de grado de esterificación; estas características fueron superiores a la pectina obtenida mediante extracción/hidrodestilación por calentamiento convencional (CE/H). Por último, los consumos totales de energía para OHAE/H (en condiciones óptimas) y CE/H fueron de 983,76 y 1042,22, respectivamente. El menor consumo de energía de OHAE/H podría estar relacionado con la generación de calor interna y uniforme.

2.5. Integración de tecnologías emergentes

Los enfoques híbridos que combinan microondas, ultrasonidos, agua subcrítica y enzimas están demostrando mejorar significativamente la eficiencia de los procesos de extracción. Estas sinergias permiten reducir los tiempos de procesamiento y minimizar el uso de disolventes, en concordancia con los principios de la química verde y la sostenibilidad en el desarrollo de bioprocesos.

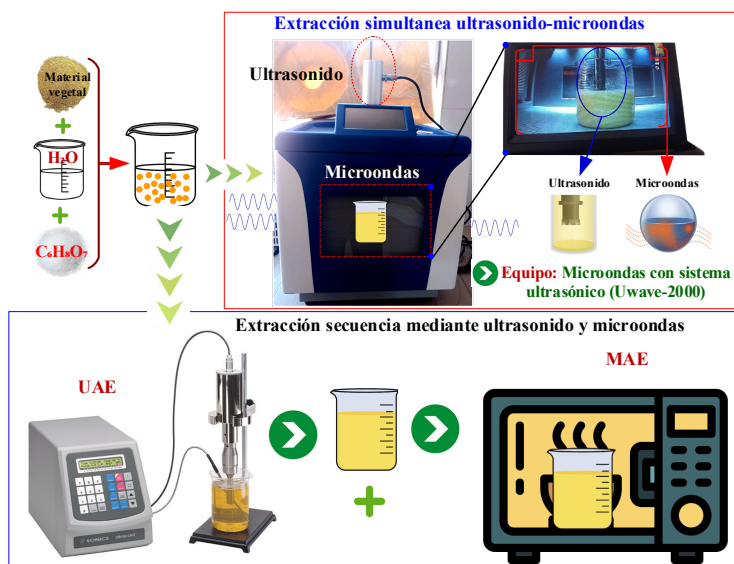
2.5.1. Extracción asistida por ultrasonidos y microondas

La combinación secuencial o simultánea de UAE y MAE es una de las técnicas híbridas más prometedoras para la extracción rápida y eficiente de pectina. La extracción asistida por ultrasonido y microondas (UMAE) combina la cavitación ultrasónica, que rompe las paredes celulares y favorece la transferencia de masa de la pectina, con el calentamiento por microondas, que incrementa la temperatura y la presión interna de las células vegetales, acelerando su disrupción (Ling et al., 2023). Los efectos sinérgicos de estas dos tecnologías resultan en una disrupción celular y un calentamiento eficiente, mejorando la transferencia de masa y promoviendo una

mayor liberación de pectina de las paredes celulares de los tejidos vegetales (Haque et al., 2025).

Figura 12

Diagrama general de la extracción secuencial y simultanea con ultrasonido y microondas



Este método reduce significativamente el uso de solventes y acorta el tiempo de extracción, haciéndolo rentable y ecológico. No obstante, Haque et al. (2025) indican que, a pesar de sus ventajas, la UMAE presenta varios desafíos, entre ellos la necesidad de equipos especializados de doble función, que incrementa considerablemente los costos iniciales de implementación. Además, la pectina puede degradarse si el calor generado por las microondas no se controla cuidadosamente. Por ello, optimizar el equilibrio entre la potencia de las microondas y la intensidad del ultrasonido es crucial para lograr una extracción eficiente sin comprometer la integridad de la pectina.

Shourove et al. (2025) optimizaron la extracción de pectina de la cáscara de sandía utilizando extracción secuencial asistida por ultrasonido y microondas (UMAE). Se evaluaron los efectos del pH (2-3), el tiempo de sonicación (40-60 min), la potencia de microondas (300-900 W) y el tiempo de irradiación (3-7 min) sobre el rendimiento de pectina. Empleando un pH de 2,01, un tiempo de sonicación de 54,23 min, una potencia de 900 W y una irradiación de 6,34, se obtuvo un rendimiento de 32,11%, una DE de 56,55% y un contenido de GalA de 84,63%. El rendimiento obtenido con UMAE (32,11%) fue mayor que utilizando MAE (17.41%), UAE (5.68%), y MUAE (24.03%); este último se refiere a que primero la muestra es tratada con microondas y después con ultrasonido. En la UMAE, la muestra pretratada con ultrasonidos 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 los polisacáridos al elevar la temperatura, acelerando la extracción de pectina. Además, la UMAE tuvo el menor consumo de energía (0,052 kWh/g de pectina seca) y CO₂ emisión (0,041 kg/g) en comparación con la MAE, UAE y MUAE.

Lasunon y Sengkhamarn (2022) estudiaron el efecto de los métodos de UAE, MAE y la extracción secuencial asistido por ultrasonido y microondas (UMAE) para la extraer de pectina de los desechos industriales de tomate. La UMAE se llevó a cabo en cuatro condiciones diferentes, de la siguiente manera: (i) la mejor condición de EAU (80 °C, 20 min, un pH de 1,5 y la SLR de 1:20) seguida de las mejores condiciones de MAE (potencia de 300 W, 10 min) [UAE + MAE], (ii) las mejores condiciones de los EAU seguidas de la mitad de la duración del tiempo de MAE (300 W durante 5 min) [UAE + 1/2 MAE], (iii) la mitad

de la duración del tiempo de los EAU (80 °C, 10 min) seguido de las mejores condiciones de MAE [1/2 EAU + MAE], y (iv) la mitad del tiempo de los EAU seguido de la mitad de la duración del tiempo de MAE [1/2 EAU + 1/2 MAE]. Los resultados mostraron que el rendimiento de pectina fueron 34,39%, 34,06%, 30,12%, 28,25% 26,49% y 19,68% obtenidos mediante UAE+1/2MAE, UAE+MAE, MAE, UAE, 1/2UAE+MAE y 1/2UAE+1/2MAE, respectivamente. Los resultados evidencian que el EAU seguido de MAE (UMAE) es un método de extracción eficiente y da un mayor rendimiento de pectina que cuando se realiza con un solo método. Esto puede explicarse por la destrucción de las paredes celulares de las materias primas durante la sonicación, esto permitió que el microondas transfiriera fácilmente los compuestos al medio de extracción.

Mobasserfar et al. (2025) optimizaron el proceso de extracción asistida por ultrasonido y microondas (UMAE) utilizando la metodología de superficie de respuesta (RSM). Los resultados indicaron que el rendimiento máximo de extracción (13,1%) de pectina de orujo de uva mediante la integración de 28,58 min de tiempo de sonicación, 600 W de potencia de microondas, 12,67 min de tiempo de irradiación y una relación líquido-sólido de 21,71 mL/g. Además, el grado de esterificación, contenido de ácido galacturónico (GalA) y peso molecular de la pectina de orujo de uva purificado fueron 72,5%, 67,9% y $6,108 \times 10^5$ Da, respectivamente.

Riyamol y Jeevitha (2024) extrajeron pectina de desechos de cáscara de cebolla utilizando solventes eutécticos profundos naturales (NASDES) mediante extracción asistida por microondas seguida de ultrasonido. Empleando un diseño de Box-Behnken, estudiaron el efecto de la

intensidad de microondas (16,15–26,82 W/g), tiempo de microondas (2-3 min) y tiempo de sonicación (10-15 min) sobre el rendimiento de extracción de pectina. La condición de extracción optimizada fue cuando se utilizó a una intensidad de microondas de 26,9 W/g durante 2,99 min, seguido de la exposición a la sonicación durante 10,18 min. Estas condiciones resultaron en un rendimiento máximo del 11,31%, un contenido de GalA del 71,28% y un grado de esterificación de 56,88%. Asimismo, indicaron que el rendimiento y otros parámetros de calidad de la pectina mejoraron con la extracción basada en NADES en comparación con la extracción convencional basada en ácido. Finalmente, los autores concluyeron que un aumento en la intensidad de las microondas proporcionó una mayor exposición a la energía de microondas que, a su vez, mejoró la tasa de penetración de los disolventes de extracción en la matriz vegetal, mientras que la exposición a ondas de ultrasonido aceleró la liberación de pectina de la matriz sólida al medio de extracción.

La integración de la UMAE para la extracción de pectina ha demostrado potencial al incrementar el rendimiento de recuperación, mayor la eficiencia energética; no obstante, existe un vacío por utilizar estas dos tecnologías de manera simultánea, dado que hasta ahora solo se han estudiado de forma secuencial (microondas seguida de ultrasonido o ultrasonido seguida de microondas).

2.5.2. Extracción enzimática asistida por ultrasonido (UEAE)

La UEAE es una tecnología de extracción emergente y eficiente que permite degradar de forma sinérgica las paredes celulares vegetales y acelerando la liberación de polisacáridos como la pectina.

Resende y Franca (2022) emplearon diferentes métodos de extracción de pectina de cáscara de jabuticaba: UAE seguida de calentamiento con microondas (40 °C, 150 W y 3 min) sin (método 1) o con celulasa (método 2) o hemicelulasa (método 3). El rendimiento de pectina osciló entre el 17,79%, 21,80% y 22,06%, mientras que el grado de esterificación fue 52,93%, 44,65% y 48,58% para los métodos 1, 2 y 3, respectivamente. Además, los métodos que utilizaron tanto las enzimas celulasa como hemicelulasa contribuyeron a un aumento en el rendimiento de pectina. Esto se explica porque las enzimas son capaces de catalizar la hidrólisis de los polímeros de la pared celular, aumentando la permeabilidad celular y, por tanto, proporcionando un aumento en la cantidad de pectina extraída.

Abou et al. (2021) estudiaron la extracción de pectina de pulpa de remolacha azucarera mediante EAE y UAE seguido de EAE. Se utilizaron xilanasas, celulosa y sus mezclas para el tratamiento enzimático. El pretratamiento ultrasónico previo a la EAE fue muy eficaz para reducir el tiempo necesario para obtener el máximo rendimiento. El rendimiento de pectina mediante tratamiento enzimático (utilizando una mezcla de enzimas xilanasas y celulosa 1:1,5) de 1 y 2 h fue del 13,3 % y el 15,2 %, respectivamente, mientras que la aplicación de un pretratamiento ultrasónico durante 15 min seguido de un tratamiento enzimático durante 1 y 2 h arrojó un 25,6 % y un 26,7 % de pectina, respectivamente. Asimismo, los resultados mostraron que el uso de mezclas de enzimas mixtas (enzimas xilanasas y celulosa 1:1,5) resultó en un rendimiento significativamente mayor que en el caso de usar las enzimas por separado. Finalmente, las pectinas extraídas mostraron una buena emulsificación de la mezcla de aceite en agua, ya que no se produjo separación de fases después del almacenamiento a 4 °C durante cuatro semanas.

2.5.3. Extracción asistida por enzimas y microondas (MEAE)

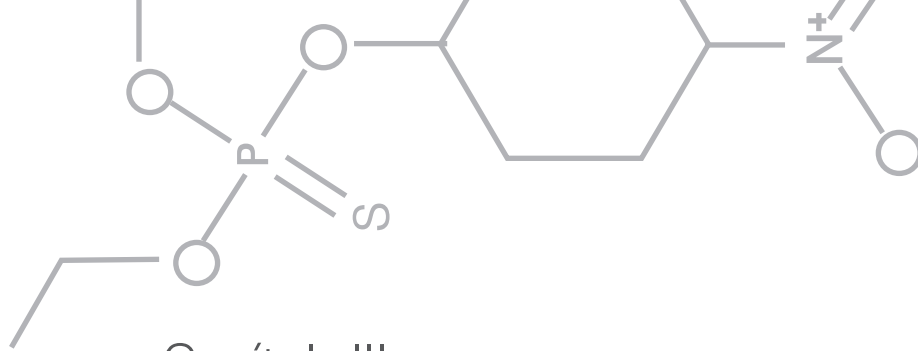
Por un lado, la extracción asistida por microondas (MAE) ha surgido como una alternativa a las técnicas convencionales, debido a su menor consumo de energía, una duración más corta, menor uso de solventes y una mayor tasa de extracción (Hossain et al., 2024). Por su parte, la extracción asistida por enzimas (EAE) es un método basado en la desintegración de la pared celular por enzimas específicas como las celulasas y las hemicelulasas; esto permite mejorar no solo el rendimiento, sino también la calidad de la pectina (Resende & Franca, 2022). La integración de estos métodos (MAE + EAE = MEAE) tiene el potencial de convertirse en una alternativa prometedora para extraer pectina que combinara el efecto térmico de la MAE y la hidrólisis enzimática de la EAE (Wang et al., 2024).

Wang et al. (2024) extrajeron pectina de la pulpa de feijoa mediante extracción asistida por enzimas de microondas (MEAE) y compararon con la extracción asistida por enzimas (EAE) y la extracción ácida convencional (EC). En condiciones óptimas (potencia de 380 W, tiempo de microondas de 9,2 min, tiempo de enzimólisis 97,0 min y un pH de 6,5), los rendimientos de pectina de la MEAE (13,13%) fueron mayores que EAE (9,26%) y la EC (7,64%). Con respecto al rendimiento evidenciaron que, con el aumento de la potencia de microondas, el pH del solvente y el tiempo de enzimólisis, la pectina produce un aumento inicial seguido de una disminución posterior. En comparación al grado de esterificación PMEAE, EAE y EC exhibieron valores del 68,43%, 67,89% y 56,16, respectivamente. Finalmente, EAE y MEAE presentaron una viscosidad y actividad biológica antioxidante superior a la pectina obtenida median EC.

2.5.4. Extracción en agua subcrítica asistida por microondas (MASWE)

La MASWE es un método de extracción de pectina más rápido, limpio y respetuoso con el medio ambiente que no utiliza ácidos (Benmebarek et al., 2025).

Como estrategia combinada, Benmebarek et al. (2025) utilizaron agua subcrítica asistida por microondas para extraer pectina baja en metoxilo de los residuos de la industria del pistacho. Durante el proceso de extracción se evaluaron dos niveles de presión (3 y 4 MPa) y temperatura (100 y 133 °C), manteniéndose constante el tiempo de irradiación en 4 min. La pectina extraída a 3 MPa, 100 °C presentó un rendimiento de extracción, contenido de GalA y un DE del 14,2%, 91,54 y 25,23%, mientras que la extraída a 4 MPa y 133 °C presentó 15.2%, 80% y 6.46%, respectivamente. Durante la extracción, evidenciaron una disminución del cuando la temperatura de extracción superó los 133 °C e indicaron que temperaturas altas promueven una mayor degradación de la pectina. Además, mencionaron que las temperaturas elevadas pueden alterar la polaridad del agua subcrítica, disminuyendo su eficacia como disolvente para la extracción de pectina. Finalmente, los investigadores concluyeron que la pectina extraída a baja temperatura (100 °C), por su fuerte capacidad gelificante y su mínimo requerimiento de sacarosa (hasta 10%), es ideal para productos que requieren geles firmes, mientras que la pectina extraída a temperatura media (133 °C), con su alto rendimiento y capacidad emulsionante, es más adecuada para alimentos funcionales.

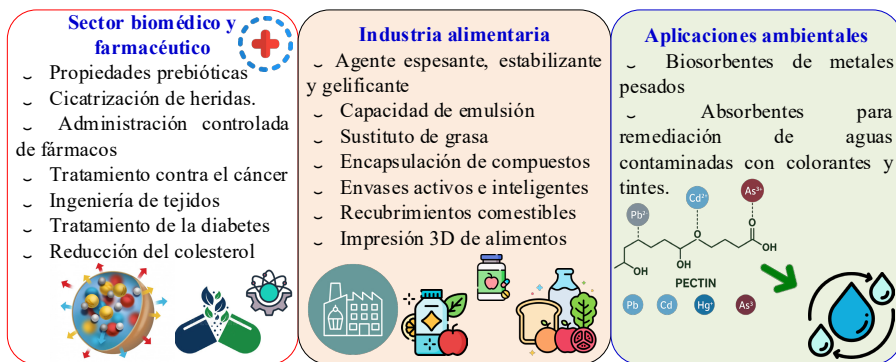


Aplicaciones tradicionales y emergentes de la pectina

El uso de la pectina es diversificado, que va desde aplicaciones alimentarias, biomédicas, farmacéuticas e incluso medioambientales. La siguiente sección ofrece una breve descripción de algunas de estas aplicaciones.

Figura 13

Principales aplicaciones de la pectina



3.1. Aplicación de la pectina en la industria agroalimentaria

La pectina es un componente natural de los materiales vegetales; por tanto, su uso se considera seguro en todos los países. En la industria agroalimentaria, la pectina es ampliamente utilizada

como agente gelificante, espesante, estabilizante y emulsionante (Freitas et al., 2021). La utilización de la pectina en la elaboración de mermeladas, jaleas, jugos, postres, helados y productos lácteos, debido a sus reconocidas propiedades gelificantes, espesantes y estabilizantes, ha sido bien documentada.

Según Hossain et al. (2024) y Benmebarek et al. (2025), la aplicación de la pectina en sistemas alimentarios dependerá en mayor medida de su grado de esterificación (DE). Las pectinas con DE inferior al 50% son ideales para productos bajos en azúcar, de amplio rango de pH, como postres lácteos, helados, salsas, aderezos y quesos, mientras que las pectinas con DE superior al 50% actúan mejor en productos con alto contenido de azúcar (>55%) y pH bajo (<3,5), como mermeladas, jaleas y dulces ácidos con un alto contenido de azúcar.

3.1.1. Pectina como sustituto de grasa

En el contexto del desarrollo de alimentos más saludables y con menor densidad calórica, en los últimos años la pectina está siendo empleada como sustituto de grasa en diversas formulaciones alimenticias, debido a que proporciona una textura y una sensación en boca semejantes a las de los lípidos (Nithish et al., 2025).

Yang et al. (2025) incorporaron pectina baja en metoxilo (LMP) derivada de la cáscara de maracuyá como sustituto de grasa en yogur descremado. Se agregaron pectina LMP en concentraciones de 0, 50, 100, 200 y 400 mg, junto con 100 mg de cultivos iniciadores de yogur por 100 mL de leche. Las muestras se homogeneizaron durante 3 min y se enfriaron a 43 °C. A continuación, el yogur se fermentó a 43 °C durante 6 h y posteriormente almacenó a 4 °C. Los resultados evidenciaron que, después de 21 días de almacenamiento, el yogur con pectina LMP

al 0,40 % no mostró separación del suero y prolongó significativamente su vida útil al mejorar la capacidad de retención de agua. Los investigadores concluyeron que la pectina LMP exhibe potencial para aplicaciones prometedoras en productos lácteos bajos en grasa.

Nithish et al. (2025) formularon una mayonesa baja en grasa utilizando gel de pectina a base de cáscara de limón como sustituto de grasa. Incorporaron 5% de gel de pectina a la mayonesa baja en grasas vegetales (LVM) y la mayonesa baja en grasas de huevo (LEM), para mejorar la textura, estabilidad y el perfil nutricional. Las formulaciones LVM y LEM presentaron un menor contenido de grasa (44,89% y 46,14%, respectivamente) en comparación con las mayonesas comerciales (52,33% y 65,13%). Además, ambas mostraron un mayor contenido proteico, evidenciando su valor nutricional superior frente a los productos convencionales. Por su parte, la muestra de CVM (mayonesa vegetal comercial) exhibió el mayor valor de firmeza, seguida de la muestra de LEM, que registró un valor de firmeza de 1,13 N. Finalmente, los resultados de la evaluación sensorial mostraron atributos favorables, incluidos el color, sabor, apariencia, acidez y la aceptabilidad general, comparables a una mayonesa comercial.

Zhang et al. (2025) utilizaron aislado de proteína de soja (SPI) y pectina de alto metoxilo (HMP) para preparar geles de emulsión compuestos como sustitutos de grasa, reemplazando del 25 % al 100 % de la grasa de lomo de cerdo en las salchichas. El reemplazo de grasa al 25 % y 50 % mejoró significativamente las propiedades de viscoelasticidad y textura de las salchichas, formando una microestructura más uniforme y compacta con un cambio de color mínimo, sin afectar las características de textura y la

aceptabilidad sensorial. Por último, en la digestión *in vitro*, las muestras reemplazadas en grasa se digieren más fácilmente, evidenciando que la pectina es una estrategia prometedora para producir productos cárnicos más saludables.

Thammawong et al. (2025) utilizaron un hidrogel hecho de polvo mixto de pectina (cáscara de piña y comercial) inducido por iones de calcio de espina de pescado como sustituto de grasa (FR) en hamburguesa de carne. A niveles de sustitución de grasa superiores al 75%, se observaron alteraciones en el color del producto. El incremento en la proporción de FR redujo significativamente el contenido de grasa, alcanzando una disminución máxima del 56% con el reemplazo total (100%). De manera concomitante, el contenido mineral total aumentó 1,72 veces, destacando el calcio con un incremento de 2,07 veces. Asimismo, tras 7 días de almacenamiento a 4 °C, la sustitución parcial de grasa por FR al 25% redujo significativamente el recuento microbiano total. Aunque el aumento de FR > un 25% redujo significativamente la aceptación general debido a los cambios en el gusto (según la evaluación sensorial). Los autores concluyeron que la sustitución de grasa en un 25 % mantuvo la calidad general, sugiriendo que FR es una opción alternativa para producir hamburguesas de carne de res más saludables con contenido reducido de grasa y calorías.

3.1.2. Potencial aplicación de la pectina en la fabricación de alimentos impresos en 3D

La impresión 3D de alimentos es una tecnología de vanguardia, centrada en la producción de alimentos personalizados, saludables y ecológicos que están listos para consumir o listos para cocinar (Wedamulla et al., 2023). La impresión 3D de alimentos se fundamenta en

la extrusión controlada de formulaciones comestibles, denominadas tintas alimentarias, que funcionan como material de impresión. Estas se depositan en forma de filamento continuo sobre un sustrato, utilizando sistemas de extrusión neumáticos, de pistón o de tornillo, para generar estructuras tridimensionales mediante un proceso aditivo capa por capa (Agarwal et al., 2021).

A pesar de los avances significativos en esta tecnología (impresión 3D), desarrollar formulaciones de tinta de impresión adecuadas para una aplicación específica continúa siendo un desafío (Agarwal et al., 2021). En ese sentido, la pectina se ha incorporado recientemente como material compatible con la impresión 3D por extrusión, al aportar las propiedades texturales y viscoelásticas necesarias para una impresión alimentaria de alta precisión (J. Xie et al., 2025).

Xie et al. (2025) desarrollaron geles compuestos de pectina soluble quelante (CSP) y aislado de proteína de soja (SPI) como tintas de impresión 3D de alimentos basadas en extrusión. Analizaron sistemáticamente el efecto de varias proporciones de SPI y CSP (1:9, 3:7, 5:5, 7:3 y 9:1) en la macroestructura y microestructura de los compuestos, las propiedades fisicoquímicas y el comportamiento reológico. Los hallazgos revelaron que el aumento de las concentraciones de SPI mejora la distribución de partículas, la viscosidad, las propiedades viscoelásticas (G' y G''), la capacidad de retención de agua y la resistencia general del gel. Se identificó como tinta alimentaria óptima para la impresión 3D la compuesta por 70% SPI y 30% CSP, presentando una excelente viscosidad, resistencia mecánica y propiedades reológicas, capaz de producir una estructura impresa de alta precisión con superficies lisas y formas estables.

Bhuiyan et al. (2025) prepararon tintas análogas a la carne para impresión 3D empleando aislado de proteína de soya (SPI), gluten de trigo (WG), aceite de canola (CO), agua destilada e hidrocoloídes. La formulación de la tinta del análogo de carne estuvo compuesta por SPI: WG: CO: H₂O: hidrocoloide (goma xantana/pectina, hidroxipropilmetilcelulosa/goma guar/goma garrofín) en las siguientes proporciones 22:12:15:88:2 (base de peso), respectivamente. Investigaron el impacto de cada hidrocoloide (como formulación de tinta) sobre los atributos de calidad relevantes de los análogos de carne a base de proteínas vegetales (SPI y WG). Los resultados mostraron que la viscosidad de la tinta análoga de carne (3871–5482 Pa s), velocidad de impresión 3D (0,34–0,39 g/s), precisión de impresión (81,97–97,27%), estabilidad dimensional (91,22–98,61%) y la pérdida de cocción (5,69–14,23%) variaron significativamente en función del tipo de hidrocoloide. La viscosidad de las tintas formuladas con goma xantana (4124 Pa s), pectina (3871 Pa s) y goma guar (4342 Pa s) fue menor que la de la muestra de control (4668 Pa s); esto podría atribuirse a la disminución de la resistencia del gel de las tintas formuladas. Sin embargo, la precisión de impresión de las tintas aumentó sustancialmente con la incorporación de hidrocoloídes de 81,97% (muestra de control: tinta formulada sin hidrocoloide) hasta el 97,27% para las tintas con hidrocoloídes, siendo la goma xantana y pectina las que presentaron mayor presión. De igual forma, las tintas análogas con goma xantana y pectina presentaron mayor estabilidad dimensional con valores 98,61 y 97,52%, respectivamente.

El creciente auge de la impresión 3D de alimentos ha impulsado a los investigadores a formular tintas listas para imprimir. Sin embargo, el desarrollo de estas se ha

convertido en un gran desafío, ya que las propiedades de la tinta de impresión 3D cambian con el almacenamiento. En ese sentido, Wedamulla et al. (2023) investigaron el efecto de la pectina en la capacidad de impresión 3D del gel de almidón de patata durante el almacenamiento en frío. En este estudio, se emplearon tres concentraciones de pectina [1, 1,5 y 2% (p/v)] con un 15% (p/v) de almidón de patata para estudiar la imprimibilidad en 3D después del almacenamiento a 4 °C durante 7 y 14 días. Los resultados sugieren que la adición de pectina mejora su capacidad de impresión 3D. El gel con pectina agregada al 2% mostró la mayor fidelidad de impresión después del almacenamiento a 4 °C para 0 (97,12%), 7 (91,45%) y 14 días (91,11%) en comparación con el control (gel de almidón de patata sin pectina), evidenciando que la pectina fue capaz de mantener un excelente rendimiento de impresión 3D incluso después de 14 días de almacenamiento en frío. Además, el contenido de pectina se correlacionó positivamente con la elasticidad (0,7), la gomosidad (0,64) y la dureza (0,63), indicando que una mayor concentración de pectina aumenta la elasticidad, gomosidad y la dureza. Finalmente, los investigadores sugieren que la pectina es un aditivo prometedor para mejorar la capacidad de impresión 3D del gel de almidón de patata.

De acuerdo con las investigaciones realizadas, la pectina está siendo considerada como un componente prometedor en tintas alimentarias para impresión 3D; de esta forma, amplía su aplicabilidad como un biopolímero multifuncional.

3.1.3. Pectina como insumo potencial para el envasado de alimentos

Los envases plásticos tradicionales para alimentos plantean importantes problemas ambientales y de salud; por

ello, los investigadores están explorando alternativas biodegradables y ecológicas. Entre estas soluciones innovadoras, la pectina ha surgido como una opción viable para usarse como biomateriales de envasado (Benmebarek et al., 2025). Su biodegradabilidad, compatibilidad, capacidad de formación de películas resistentes y versatilidad hacen de la pectina una opción atractiva para desarrollar alternativas ecológicas a los plásticos convencionales no biodegradables en ciertas aplicaciones (Said & Lee, 2025).

Estudios recientes indicaron que el tipo de fuente de pectina, así como el contenido de GalA y el DE, influyen significativamente en el rendimiento y la calidad de la película, puesto que un mayor contenido de GalA mejora la resistencia y flexibilidad de la película, al mismo tiempo que afecta las propiedades de barrera de humedad (Said & Lee, 2025). En un estudio, Said et al. (2023) indicaron que los patrones de esterificación afectan significativamente la resistencia y flexibilidad de la película, comprobándose una fuerte correlación positiva ($r = 1,0$) entre DE y las propiedades mecánicas en películas de cáscaras de cítricos híbridos.

Las películas formuladas con pectina LMP (DE<50%) presentan mayor alargamiento a la rotura (EAB), haciéndolas adecuadas para aplicaciones que requieren flexibilidad y capacidad de estiramiento, pero con menor resistencia a la tracción (TS) (Said & Lee, 2025). Por ejemplo, las películas de pectina de higo (DE, 34,2%) presentaron TS moderada (3,11 MPa) y EAB (15,19%), haciéndolas ideales para recubrimientos que requieren tanto flexibilidad como resistencia moderada (Çavdaroğlu et al., 2023). Por su parte, las películas de pectina de tallo higo (DE, 45%) presentaron un TS mejorado de 6,50 MPa y un EAB más alto (26,17%), sugiriendo que un ligero aumento en

DE mejora la tenacidad de la película mientras mantiene la flexibilidad (Çavdaroglu et al., 2023). En esa misma perspectiva, Fu et al. (2022) realizaron un estudio comparativo entre películas de pectina cítrica con bajo y alto grado de esterificación (LMP y HMP, respectivamente); las películas con LMP (DE, 26,50%) exhibieron valores de TS más bajos (21,15–23,85 MPa) con EAB (2,59–3,88%). Por el contrario, las elaboradas con HMP (DE, 69,50%) demostraron una mayor TS (30,61 MPa) mientras mantenían un EAB de 3,93%. Las pectinas HMP, debido a su mayor peso molecular y densidad, generan cadenas poliméricas largas que favorecen el entrelazamiento intermolecular, aumentando la viscosidad, resistencia y flexibilidad de las películas, así como su TS y EAB, al formar redes densas y cohesivas (Said & Lee, 2025).

En general, las películas a base de pectina generalmente tienen una resistencia a la tracción moderada (6,96 a 9,34 MPa, dependiendo del DE), mientras que las elaboradas a base de proteínas como la gelatina presentan un rango más amplio con valores que van desde 5,8 a 15,4 MPa e incluso superiores (Shah et al., 2023). En términos de elongación a la rotura, las películas a base de pectina muestran una flexibilidad más limitada (10% a 36,85%), siendo inferiores a las películas a base de proteínas que pueden estirarse hasta 471%, como es el caso de las películas a base de gelatina (Shah et al., 2023). No obstante, la incorporación de quitosano potencia las películas de pectina, elevando su resistencia a la tracción hasta 71,64 MPa, representando una forma de potencializar las propiedades mecánicas de las películas derivadas de pectina (Priyadarshi et al., 2021).

Figura 13

Diagrama general de obtención de bioplásticos o biopelículas de pectina



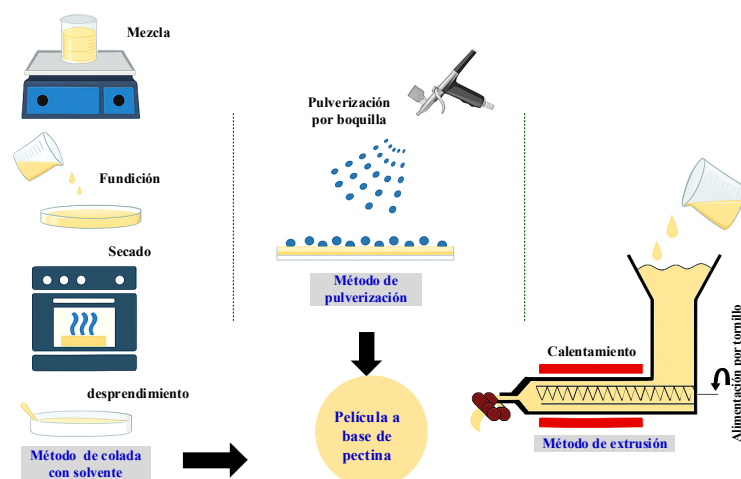
Por otro lado, la pectina se puede combinar con otros polímeros para mejorar aún más sus propiedades mecánicas, físicas y de barrera de las películas (Yang et al., 2024). Por ejemplo, la película de pectina de caqui mezclada con alginato de sodio y goma guar, así como la película de pectina de hoja de brócoli combinada con almidón de tapioca, mostraron mejoras significativas en la resistencia mecánica y resistencia al agua (Song et al., 2023). De manera similar, la combinación de pectina con polihidroxialcanoato y extracto de posos de café no solo mejoró sus propiedades mecánicas (TS: 9,1 MPa, EB: 16,1%), sino que también mostró una mayor capacidad de barrera al agua (Mirpoor et al., 2023). Estas mejoras confieren una mayor versatilidad a las películas basadas en pectina, permitiendo su adaptación a una amplia gama de aplicaciones.

Asimismo, Said y Lee (2025) indican que los métodos de formación de películas son esenciales para determinar las propiedades finales del material de envasado y su viabilidad comercial al desarrollar envases a base de pectina. Estos métodos pueden clasificarse en general en procesos húmedos (métodos de colada y pulverización) y secos

(método de extrusión), cada uno con sus propias técnicas y características.

Figura 14

Diagrama esquemático de los métodos de formación de películas a base de pectina



Nota. La figura fue adaptada de Said y Lee (2025)

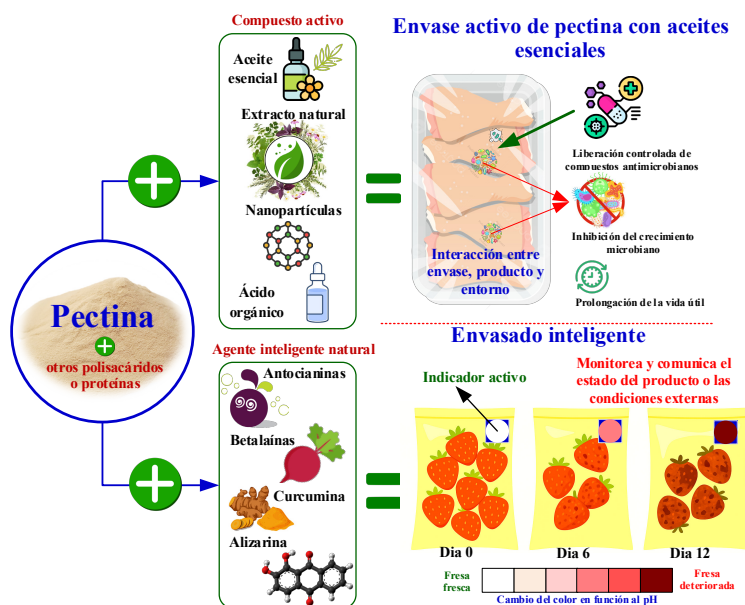
Adicional a ello, es importante mencionar que, para obtener películas de pectina con características mejoradas, es fundamental considerar la adición de plastificante como el glicerol o el sorbitol; esto ayuda a mejorar la flexibilidad y reducir la fragilidad de las biopelículas, ampliando aún más la aplicación de la pectina en el envasado de alimentos (Dirpan et al., 2024).

a. Películas a base de pectina para envases activos e inteligentes

En la industria del envasado de alimentos, la pectina está demostrando ser una materia prima prometedora para la producción de envases activos e inteligentes (Said & Lee, 2025).

Figura 15

Esquema general del uso de la pectina como matriz en el envasado activo e inteligente



El envasado de película activa representa un enfoque innovador para la conservación de alimentos, incorporando compuestos activos en los materiales de envasado (como las películas de pectina) para crear una interacción dinámica entre envase, producto y entorno con el fin de prolongar la vida útil, mejorar la seguridad y preservar la calidad de los alimentos (Said & Lee, 2025). Dependiendo del agente activo incorporado, estos sistemas pueden inhibir el crecimiento microbiano, evitar la oxidación de componentes, absorber o eliminar compuestos indeseables como oxígeno, etileno o humedad en el entorno del envase; esto se traduce en una mayor vida útil del producto (Dirpan et al., 2024). Dentro de los agentes activos que pueden incluirse en los sistemas de envasado activo están los aceites esenciales, extractos de plantas, nanopartículas

metálicas y otras sustancias que contribuyen a la conservación de la calidad de los alimentos (Said & Lee, 2025).

FUENTE DE COMPUESTO ACTIVO	COMPONENTES DE LA PELÍCULA	PRODUCTO APLICADO	PRINCIPALES HALLAZGOS	AUTOR
Nanopartículas de TiO ₂ y flavonoides de hojas de <i>Lythium barbarum</i>	Pectina de cáscara de sandía, almidón de patata	Carne de cordero	Película activa prolongó la vida útil del producto a 15 días frente a 9 días del control e inhibió significativamente el crecimiento de microorganismos y redujo la oxidación lipídica	(Xie et al., 2023)
Extracto metanólico de cáscara de pomelo y cáscara de limón encapsulado	Pectina de cáscaras de pomelo	Tomates cherry	Las películas fueron eficientes en la inhibición del crecimiento de <i>E. coli</i> O157:H7 después de 6 días de almacenamiento refrigerado	(Khalil et al., 2023)
Aceite esencial de cúrcuma	Almidón de maíz, pectina de cáscara de maracujá	Pan de molde	La película activa con 3 % exhibió una actividad antifúngica resultó en una muestra libre de contaminación durante 9 semanas.	(Araújo et al., 2023)
Galato de epigallocatequina con natamicina	Quitosano con natamicina (CN), pectina cítrica con contenido galato de epigallocatequina (PE)	Fresas	Las películas multiactivas de CN/PE al 15% extendió mayor la vida útil de la fresa (8 días) a temperatura ambiente en comparación al control (4 días)	(Fu et al., 2024)
Las antocianinas cáscara de la semilla de girasol púrpura yaceite esencial de la flor de girasol	Pectina de la cabeza de girasol y la gelatina (capa externa) y las nanofibras electrohiladas de zeína (capa interna).	Pechugas de pollo almacenadas a 4 °C	La película activa de doble capa exhibió propiedades antioxidantes y antibacterianas sinérgicas contra <i>E. coli</i> y <i>S. aureus</i> . Su aplicación en pechugas de pollo demostró que la película no solo monitoreó la frescura del pollo, sino que también prolongó su vida útil hasta 12 días.	(Darkak et al., 2025)
Ácido cinámico	Alginato de sodio, pectina de cáscaras de cítricos	Carne fresca de res	La película mostró una reducción del 84,09% de la carga bacteriana en la carne de res logrando alargar la vida útil hasta 5 días de almacenamiento en refrigeración	(Tong et al., 2023)
Aceite esencial de mandarina (AE)	Glucomanano de konjac, pectina	Fresas	La incorporación del 1,5% de AE a la película redujo la transpiración y la respiración de las fresas, protegió la fruta de la oxidación y los patógenos (<i>S. aureus</i> y <i>E. coli</i>), retrasó eficazmente su maduración y prolongó la vida útil de las fresas hasta 8 días (mayor que los 4 días del control)	(Y. Liu et al., 2024)
Polifenoles de hoja de brócoli	Almidón de tapioca, pectina comercial	Carne de cordero refrigerado	La película compuesta retrasó el crecimiento microbiano y minimizó la rancidez oxidativa, extendiendo su vida útil a 12 días mayor que el control (9 días)	(Song et al., 2023)
Aceite esencial de romero	Alcohol polivinílico (PVA), pectina de cáscara de limón y maracujá	Fresa y ciruelas	Según índices de deterioro, las frutas sin envasar tuvieron una vida útil inferior a 7 días, mientras que las envasadas en película activa se mantuvieron aceptables hasta 15 días en el caso de las fresas y 45 días en el caso de las ciruelas, almacenadas a 6 °C	(Kanatt, 2024)

Por otro lado, el envasado inteligente se define como un sistema de envasado capaz de monitorear las condiciones en tiempo real del contenido y brindar información sobre la calidad, seguridad e integridad del producto; es decir, actúa como un sistema de alerta mediante indicadores internos o externos (Ahmed et al., 2022). Como indicadores, los compuestos de color derivados de extractos de plantas, como las antocianinas, betacianinas y curcumina, desempeñan un papel crucial como indicadores intelligen-

tes de color en los envases de película, especialmente de pectina, proporcionando pistas visuales sobre la frescura de los alimentos, las variaciones de pH y la exposición a las condiciones ambientales (Said & Lee, 2025).

La Tabla 6 presenta películas inteligentes a base de pectina funcionalizada con indicadores colorimétricos naturales, empleadas para monitorear cambios en la calidad y frescura de los alimentos en función de la variación del pH.

Tabla 6
Películas inteligentes a base de pectina con colorantes naturales

Componentes de la película	Agente inteligente	Tipo de indicador	Aplicación	Hallazgos principales	Autor
Gelatina, pectina, glicerol	Antocianina de cascara de pistacho	pH	Camarón	El color cambia de cereza/rosa a amarillo/marrón, indicando frescura y deterioro a diferentes niveles de pH.	(Taheri et al., 2024)
Pectina, nanofibra de quitosano	Antocianina de zumaque	Amoniaco, pH	Camarón	Cambios de color de la antocianina: Rojo a pH 2-4, verde oscuro a pH 8, color oliva a pH 9, color vara de oro a pH 10 y 11, y color vara de oro oscuro a pH 12. Cambios de color de la película: Rojo a pH 7,1 y verde-amarillo pH 8,06 después de 24 h.	(Tavassoli et al., 2023)
Pectina, alginato de sodio, nanocristales de celulosa	Antocianina de col lombarda	pH	Camarón	Cambios de color de la película: rojo a pH 2, rojo violáceo a pH 3-8, azul a pH 9-11 y amarillo verdoso a pH 12	(Lei et al., 2023)
Pectina, quitosano, glicerol	Antocianina de arroz negro	Amoniaco, pH	Carne de cerdo y ternera	Cambios de color de la película: magenta a pH 1-4, azul a pH 5-12 y verde chartreuse a pH 13	(Zeng et al., 2023)
Pectina de cáscara de cidra	Antocianina de <i>Phaseolus vulgaris</i>	pH	Carne de pollo	Cambios de color de la antocianina: color púrpura oscuro a pH 2-5, púrpura claro a pH 6-7 y marrón amarillento a pH 8-12. Cambios de color de la película: rosa el día 1, marrón claro el día 4 y marrón oscuro el día 8.	(Sudharsan et al., 2023)
Antocianinas/pectina	Antocianina de la col morada	pH	Pechuga de pollo	Cambios de color de la película: púrpura a pH 3-6, violeta a pH 7 y verde a pH 8-11	(Huang et al., 2024)
Pectina de cáscara de sandía	Betacianina de remolacha	pH	Carne de res	Cambios de color de la película: Rojo oscuro a pH 3-7, morado a pH 8 y amarillo a pH 9-10. En su aplicación en el envasado de carne de vacuno, el color de la película cambió de amarillo a marrón a los 8 días de observación	(Guo et al., 2021)
Pectina de cáscara de pitaya de pulpa blanca, glicerol, montmorillonita	Betacianinas de cáscara de pitaya de pulpa blanca	pH, amoniaco	Camarón	El color de la película compuesta cambió de rojo (pH, 6,90) a marrón rojizo (pH, 7,35) y posteriormente a marrón (pH, 7,84), reflejando la transformación del camarón de fresco a podrido	(Jiang et al., 2023)

En general, la pectina está siendo utilizada como ingrediente funcional en la fabricación de materiales de envasado de alimentos. En los envases activos, se combina con agentes antioxidantes, antimicrobianos y otros compuestos para prolongar la conservación de frutas, verduras, carnes y diversos alimentos. Paralelamente, en envases inteligentes, la incorporación de indicadores naturales en películas de pectina permite monitorear en tiempo real las condiciones del contenido, aportando información sobre la calidad, seguridad e integridad del producto.

3.2. Aplicaciones biomédicas y farmacéuticas de la pectina

Esta sección explora las múltiples funciones de la pectina en las áreas biomédicas y farmacéuticas, donde los estudios citan a la pectina como un polisacárido con efectos prometedores para la salud, que se está explorando como vehículo para la administración de fármacos, administración de genes, cicatrización de heridas, reducción del colesterol y la ingeniería de tejidos (Freitas et al., 2021). Además de sus propiedades antibacterianas, prebióticas, antioxidantes y anticancerígenas, también contribuyen a su uso en el sector farmacéutico y biomédico (Singhal & Swami, 2022).

3.2.1. Pectina para la administración de fármacos

Debido a su biocompatibilidad, ventajas para la salud, no toxicidad y biodegradabilidad, la pectina es considerada un biomaterial prometedor para la administración de fármacos dirigida y liberación controlada mediante la formación de hidrogeles (Kedir et al., 2022). Además, la pectina puede interactuar con las moléculas del fármaco para formar enlaces covalentes, iónicos y de hidrógeno, ayudando a regular la velocidad de liberación del fármaco y mejorar la biodisponibilidad (Yi et al., 2024).

La pectina se ha empleado en una variedad de formulaciones, incluidos hidrogeles, películas, microesferas y nanopartículas, para dirigirse a varios medicamentos (Yi et al., 2024). Esto debido a que la pectina constituye un excipiente prometedor para sistemas de liberación colónica de fármacos, debido a su estabilidad en el ambiente gastrointestinal fluctuante y su degradación enzimática específica por pectinasas de la microbiota colónica, donde las moléculas de fármaco son liberadas (Kedir et al., 2022).

Zhou et al. (2022) prepararon un hidrogel autorreparador a partir de pectina biodegradable y polietilenglicol biocompatible e investigaron su aplicación como vehículo de administración de doxorubicina (DOX) para un tratamiento tumoral. Los hidrogeles mostraron una excelente biocompatibilidad y biodegradabilidad tanto in vitro como in vivo, con un comportamiento de liberación controlada del fármaco basado en una estructura microporosa tridimensional. Además, el hidrogel cargado con DOX pudo inhibir significativamente el crecimiento tumoral en ratones en comparación con la inyección directa de DOX. Los investigadores concluyeron que el hidrogel a base de pectina tiene un gran potencial de bioaplicaciones en los campos de administración localizada de fármacos para la terapia antitumoral.

3.2.2. Pectina como apósitos para cicatrización de heridas

Los hidrogeles y películas a base de pectina son apósitos eficaces que promueven la cicatrización y reducen el riesgo de infección (Yi et al., 2024). Los apósitos de hidrogel de pectina crean un ambiente húmedo en la herida, previenen infecciones secundarias, facilitan el autodesbridamiento de los tejidos necróticos y de granulación, y

mejoran la eficacia de la cicatrización, esto convierte a la pectina en una opción ideal para estas aplicaciones (Zhao et al., 2023).

Chen et al. (2021) desarrollaron un hidrogel compuesto de pectina/celulosa, preparado mediante reticulación química para aplicaciones hemostáticas. Los resultados indicaron que el hidrogel posee una densa estructura reticular, conserva los enlaces químicos y la estructura cristalina tanto de la pectina como de la celulosa, y demuestra buena estabilidad térmica, así como una excelente biocompatibilidad. Este hidrogel exhibe extraordinarios efectos hemostáticos tanto en experimentos *in vitro* como *in vivo*, reduciendo significativamente el sangrado en un corto período. Por consiguiente, este hidrogel compuesto presenta prometedoras aplicaciones clínicas como posible apósito hemostático rápido para heridas.

Nordin et al. (2022) examinaron la influencia de las películas de hidrogel de pectina sin fármacos en las heridas por quemaduras de espesor parcial utilizando ratas diabéticas inducidas con estreptozotocina como modelo animal. Se prepararon dos formulaciones diferentes de películas de hidrogel de pectina, PH 2,5% y PH 5%, y se compararon con una formulación herbal comercial (MEBO®). Los resultados mostraron que las ratas diabéticas tratadas con PH 5% cicatrizaron más rápido que las ratas diabéticas no tratadas y las tratadas con PH 2,5%. Además, las ratas diabéticas tratadas con PH 5% cicatrizaron tan bien como las tratadas con MEBO®, cuyas heridas cicatrizaron completamente el día 20. No obstante, tanto PH 2,5% como PH 5% mostraron una mayor zona de inhibición que MEBO® al probarse contra *Staphylococcus aureus*.}

3.2.3. Pectina en el tratamiento del cáncer

La posible implicación de la pectina en la terapia contra el cáncer está siendo objeto de investigación, y ciertos estudios indican que sus características específicas podrían tener efectos beneficiosos en la prevención y el tratamiento del cáncer (Sharma et al., 2025). En especial, la pectina cítrica modificada (MCP) está ganando popularidad a medida que se acumula evidencia de su alta eficacia para reducir el desarrollo y la propagación de neoplasias malignas (Emran et al., 2022).

La pectina modificada (MCP) es una pectina sometida a modificaciones químicas, térmicas, enzimáticas o por radiación, con el fin de degradar sus polímeros y reducir el grado de esterificación, lo que le confiere potenciales efectos antitumorales (Dixit et al., 2025). Esta modificación ha hecho que la pectina se descomponga en pedazos más pequeños que el cuerpo puede absorber. Esto ha hecho que la MCP sea potencialmente considerada como un fármaco antimetastásico prometedor derivado de frutas cítricas con propiedades únicas que lo hacen eficaz para inhibir la propagación de células cancerosas (Dixit et al., 2025).

Emran et al. (2022) realizaron una investigación sistemática, donde recopilaron 108 publicaciones que ayudaron a describir en profundidad el papel de la pectina en la prevención del cáncer. Los investigadores concluyeron que los efectos citotóxicos de la pectina le confieren propiedades anticancerígenas, que han demostrado inhibir el crecimiento y la proliferación tumoral. Además, indicaron que las pectinas cítricas modificadas inhiben casi todas las células cancerígenas mediante la inhibición de la vía de señalización proteína quinasa activada por mitógeno (MAPK).

Asimismo, Emran et al. (2022) señalaron que las MCP inhiben la formación de émbolos ordenados y reducen el crecimiento tumoral del cáncer de próstata, interfiriendo en la adhesión celular necesaria para la metástasis hepática. También, disminuyeron la viabilidad celular in vitro, tanto en modelos dependientes como independientes de andrógenos, favoreciendo la apoptosis mediante la activación de caspasa 3 y la inhibición de la vía MAPK. Además, mencionaron que pectina derivada de *Lycium ruthenicum* Murr inhibió las vías de señalización MAPK y la quinasa de adhesión focal (FAK)/proteína quinasa B (AKT)/glucógeno sintasa quinasa-3 (GSK-3) en las líneas celulares de cáncer de páncreas BxPC-3, PANC-1 y AsPC-1 (Emran et al., 2022).

En otro estudio, la pectina derivada de cítricos (CP) y la pectina de manzana (AP) suprimieron las células de cáncer de mama MDA-MB-231, MCF-7 y T47D, encontrando que CP y AP inhibieron las células cancerosas en las fases S y G1 o G2/M del ciclo celular. De forma similar, la expresión de galectina-3, una lectina implicada en la adhesión celular, el ciclo celular y la muerte celular, se redujo con CP y AP. Además, se observó daño oxidativo y rotura de cadena del ADN en células MDA-MB-231; esto ralentizó su proliferación (Salehi et al., 2018).

En general, los estudios han resaltado que la pectina desempeña un papel importante en la terapia del cáncer, y que puede potencializarle en combinación con los tratamientos quimioterapéuticos tradicionales (Freitas et al., 2021). En particular, la pectina cítrica modificada ha mostrado efectos significativos en la inhibición de la galectina-3, conduciendo a una reducción del tamaño del tumor, la metástasis y el crecimiento (Sharma et al., 2025). La galectina-3 es una proteína multifacética y pro-metastásica

que está involucrada en varias etapas de las patologías del cáncer, desde la expansión tumoral, angiogénesis, diseminación metastásica y la reacción de las células cancerosas a intervenciones citotóxicas (Drishya & Wani, 2024). La hipótesis plantea que la galectina-3 reconoce de manera específica los galactanos de la pectina, sirviendo como la causa subyacente de su acción inhibidora (Drishya & Wani, 2024).

3.2.4. Otras aplicaciones biomédicas y farmacéuticas de la pectina

Además de lo citado anteriormente, se ha demostrado que la pectina posee potencial actividad antidiabética, además de otras actividades biológicas, como la reducción del colesterol, la actividad antioxidante, los efectos antiinflamatorios e inmunomoduladores (Soomro et al., 2024). Existen varios mecanismos antidiabéticos asociados a la pectina, como la regulación del metabolismo de la glucosa, la reducción del estrés oxidativo, el aumento de la sensibilidad a la insulina, la supresión del apetito y la modulación del microbioma intestinal (Dixit et al., 2025). Estudios han demostrado que la suplementación con pectina tiene efectos antidiabéticos en diferentes modelos animales e in vitro. En estudios con humanos, se ha observado que la pectina tiene un efecto positivo en el control de la glucemia, especialmente en personas con diabetes tipo 2 (Soomro et al., 2024).

Recientemente, Liu et al. (2025) desarrollaron un sistema de administración de emulsión utilizando gelatina de piel de pescado (FSG) y pectina (PEC) como emulsionantes complejos para encapsular isotiocianato de bencilo (BITC). Los resultados indicaron que la emulsión FSG-PEC mejoró significativamente la

biodisponibilidad de BITC en comparación con la emulsión de agua y los sistemas de un solo emulsionante, logrando la administración dirigida. La emulsión FSG-PEC cargada con BITC redujo significativamente los niveles de colesterol de lipoproteínas de baja densidad, colesterol y triglicéridos, alivió las lesiones de enzimas hepáticas, disminuyó los niveles de creatinina y nitrógeno ureico en sangre, alivió el estrés oxidativo inducido por hiperglucemia, mejoró la capacidad antioxidante del hígado, redujo el contenido de factor proinflamatorio en el hígado y mejoró el daño del tejido hepático y de los islotes en ratones con diabetes tipo 2.

Además, la pectina tiene potencial para la reducción de los niveles de colesterol en sangre (Chandel et al., 2022). En particular, estudios indican que la pectina HMP de alto peso molecular reduce los niveles de colesterol con mayor eficacia que la pectina LMP (Freitas et al., 2021). La reducción del colesterol está asociada a que la pectina tiene el potencial de interrumpir la producción de micelas, impedir la difusión de ácido biliar, obstruir la absorción de micelas que contienen colesterol y reducir la tasa de difusión de ácido biliar (Soomro et al., 2024). Es decir, al ser la pectina un ácido débil, resiste la disociación en el entorno gástrico y se une covalentemente a los sitios activos de la lipasa pancreática (Freitas et al., 2021).

3.3. Otras aplicaciones de la pectina

Además de la información mencionada hasta ahora, debemos tener en cuenta que las aplicaciones no se limitan a las industrias de alimentos, farmacéutica y productos biomédicos. Actualmente, las pectinas extraídas de diferentes fuentes de biomasa se han investigado como en la eliminación de metales del agua, adsorbentes de tintes, en la ingeniería tejidos y fuentes de alma-

cenamiento de energía entre otros, debido a su biodegradabilidad, biocompatibilidad, no toxicidad y relación costo-beneficio (Arora et al., 2024).

3.3.1. Pectina para la eliminación de metales en el agua

El problema de la contaminación de las fuentes de agua causada por iones de metales pesados ha atraído una atención considerable, ya que estos contaminantes son difíciles de degradar en el medio ambiente y suponen riesgos para los ecosistemas y la salud humana. En este sentido, la capacidad quelante de la pectina resulta especialmente útil en la remoción y purificación de metales pesados en ecosistemas ambientales (Singhal & Swami, 2022).

Namasivayam et al. (2024) investigaron la efectividad de un nanocompuesto basado en pectina de cáscara de plátano y hierro de valencia cero nanométrica en la adsorción de metales pesados (mezcla de cromo y plomo), junto con la evaluación de sus propiedades antibacterianas. Las condiciones óptimas se determinaron como pH 8,0, una temperatura de 40 °C, una dosis de adsorbente de 1,0 g/L, una concentración inicial de bimetalo de 75 mg/l y un tiempo de contacto de 30 min, logró remover hasta un 97% de los metales pesados. Evaluaciones posteriores revelaron que el nanocompuesto no indujo efectos fitotóxicos ni ecotóxicos, confirmando su no toxicidad y su seguridad ambiental. Asimismo, estudios de biocompatibilidad realizados con modelos de pez cebra no mostraron efectos adversos en la eclosión, la supervivencia ni la frecuencia cardíaca.

Shao et al. (2021) desarrolló un tipo de adsorbentes a partir de quitosano y pectina CPB) CPB totalmente ecológicos para la eliminación de Cu(II), Cd(II), Hg(II) y Pb(II) de soluciones acuosas. Las capacidades máximas

de adsorción de Cu(II), Cd(II), Hg(II) y Pb(II) fueron de 169,4, 177,6, 208,5 y 266,5 mg/g, respectivamente. Los experimentos de adsorción-desorción revelaron que las CPB exhibieron una gran reutilización. Además, los autores indicaron que la adición de pectina no solo creó una estructura estable y porosa, sino que también introdujo numerosos grupos funcionales carboxilo, que favorecieron el aumento de la superficie específica y los sitios de adsorción activos.

Ahmad et al. (2023) tuvieron como objetivo eliminar metales pesados (cobre (Cu), el plomo (Pb) y el níquel (Ni)), utilizando hidrogeles biodegradables y rentables a base de pectina y carboximetilcelulosa. se encontró que la absorción máxima para Cu (II) y Pb (II) fue > 99,8%. Mientras que para Ni (II), fue > 85% a una concentración de iones metálicos de 0,2 mmol/L. Estos resultados demostraron la síntesis exitosa de un adsorbente sostenible y económico para eliminar HMI de las aguas residuales.

3.3.2. Pectina como absorbente

El vertido sin tratar de tintes industriales puede alterar el equilibrio ecológico y plantear riesgos no solo a salud humana sino también a diversidad acuática. Mohrazi y Ghasemi (2023) desarrollaron un compuesto de quitosano-pectina (Cs-Pc) como adsorbente para eliminar el colorante azul de metileno (MB) de aguas residuales sintéticas. Las condiciones óptimas se obtuvieron a un pH de la solución ~ 11, dosis de Cs-Pc: 1,5 g/L y tiempo de contacto de 180 min, esto resultó en una eliminación del 97,77% de MB. Asimismo, evidenciaron que Cs-Pc tuvo una mayor capacidad para remover MB que el quitosano y la pectina de forma individual, probablemente debido a su estructura altamente porosa y superficies rugosas que

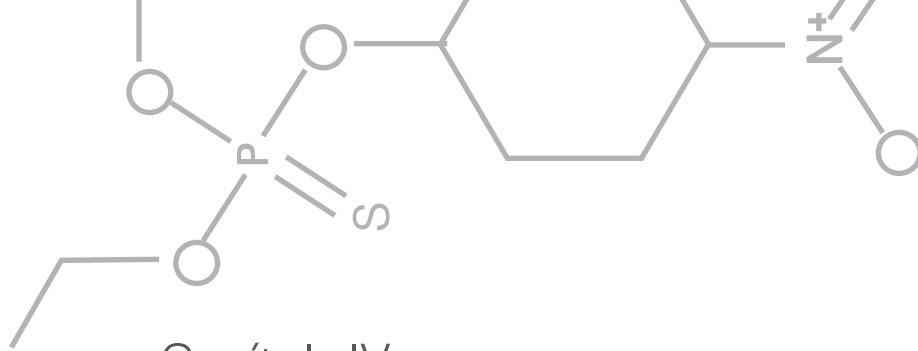
proporcionan sitios activos y facilitan la adsorción de MB.

Ghnim et al. (2025) obtuvieron un nuevo utilizando pectina, quitosano y estructuras metal-orgánicas para la adsorción de colorantes (rojo Congo) y la inhibición de bacterias patógenas. La tasa de adsorción más alta se determinó en 93% utilizando 0,06 g/L de hidrogel en condiciones que incluyen pH 8, temperatura de 25 °C y tiempo de contacto de 90 min. Las evaluaciones microbiológicas del hidrogel, se realizaron contra cepas conocidas de aguas residuales como *Campylobacter jejuni*, *Shigella dysenteriae*, *Vibrio cholerae*, *Yersinia enterocolitica* y *Salmonella enterica*, indicaron sus altas propiedades antibacterianas, por lo que se observaron valores de Concentración Mínima Inhibitoria (CMI) y Concentración Mínima Bactericida (CMB) entre 4 y 32 µg/mL y 8–64 µg/mL.

Nandal y Jindal (2025a) prepararon un hidrogel utilizando los polisacáridos naturales pululano y pectina como componentes principales, con epiclorhidrina como agente de reticulación para integrar estas estructuras poliméricas. El hidrogel sintetizado demostró una eliminación eficaz de colorantes catiónicos y aniónicos, específicamente eosina B (EB) y Bismarck Brown R (BBR), en soluciones acuosas. Del mismo modo, Nandal y Jindal (2025b) sintetizaron un novedoso hidrogel nanocompuesto de pectina/pululano/caolinita mediante la reticulación química de pectina, pululano y caolinita intercalada con NaOH. El hidrogel resultante exhibió una integridad mecánica mejorada, una capacidad de hinchamiento superior (1797%) y un excelente rendimiento de adsorción de colorante. Se lograron eficiencias de remoción óptimas del 93.8% para el colorante violeta cristal (CV) y del 84.8% para el colorante rojo Congo (CR) bajo condiciones específicas: para CV a pH 9, 40 °C, 0.5 g de adsorbente, 50

mg/L de concentración de colorante y 300 min de tiempo de contacto; y para CR a pH 5, 40 °C, 0.5 g de adsorbente, 10 mg/L de concentración de colorante y 240 min de tiempo de contacto.

La preparación de estos adsorbentes es significativa en el campo del tratamiento de la contaminación por tintes y contribuye al desarrollo de materiales eficientes de adsorción de aguas residuales.



Aplicaciones tradicionales y emergentes de la pectina

La pectina, es un polisacárido natural derivado de fuentes vegetales, a lo largo de este libro se ha evidenciado que las principales fuentes de extracción son las cáscaras de cítricos, pulpa de manzana, sin embargo, en los últimos años, ha aumentado el interés en utilizar residuos alternativos como pulpa de tomate, cáscaras de sandía, mangos, plátanos, maracuyá, entre otros para promover prácticas de economía circular. El rendimiento de pectina así como sus propiedades varía en función de la técnica de extracción (convencional o emergentes), 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. El grado de esterificación, contenido de GalA, peso molecular y el grado de metoxilación, junto con sus propiedades emulsificantes y funcionales, constituyen parámetros críticos a considerar para determinar la aplicabilidad de la pectina en diferentes sectores.

En cuanto a la obtención, se ha evidenciado que la extracción ácida convencional es un método establecido industrialmente, no obstante, este método plantea importantes desafíos ambientales y económicos debido al alto consumo de energía y la generación de residuos químicos. Por ello, en los últimos años los investigadores han optado gradualmente por técnicas de extracción sostenibles como la MAE, UAE, EAE, OHAE y SWE, así como la integración de las mismas. Estas tecnologías

analizadas son una alternativa prometedora a los métodos convencionales para reducir el uso de disolventes nocivos, el consumo excesivo de energía, aumentar el rendimiento y producir pectina en menor tiempo y con mejores propiedades. Cada una de las técnicas mencionadas presenta ventajas y limitaciones que deben evaluarse cuidadosamente, y su selección debe basarse en aplicaciones específicas. Estas tecnologías no solo responden a la necesidad de eficiencia industrial, sino también a los compromisos globales con la sostenibilidad ambiental del sector agroalimentario y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

El uso de la pectina es diversificado, que va desde aplicaciones alimentarias, biomédicas, farmacéuticas e incluso medioambientales. En la industria agroalimentaria, la pectina es ampliamente utilizada como agente gelificante, espesante, estabilizante y emulsionante en mermeladas, jaleas, jugos, salsas, postres, helados y productos lácteos. Y las últimas investigaciones han resaltado el potencial como sustituto de grasa, tintas alimentarias para impresión 3D de alimentos y la creación de envases activos e inteligente para alimentos. En el sector biomédico y farmacéutico, los estudios citan la potencial utilización de la pectina como vehículo para la administración de fármacos, administración de genes, cicatrización de heridas, reducción del colesterol, ingeniería de tejidos y el tratamiento de diabetes, y cáncer. Además de las aplicaciones citadas anteriormente, los usos emergentes de la pectina implican en la purificación de metales pesados, absorbente de colorantes entre otras aplicaciones.

Entre los principales retos asociados a la investigación y aplicación de la pectina, destaca la necesidad de optimizar las condiciones de extracción mediante tecnologías emergentes, buscando procesos más eficientes, sostenibles y con menor impacto ambiental. La integración de estas tecnologías, con énfasis en la recuperación de pectina a partir de residuos agroalimentarios, representa una oportunidad estratégica para satisfacer la creciente demanda de biopolímeros de alta calidad, seguros y ecológicos. No obstante, un desafío crucial es el desarrollo de equipos a escala industrial que permitan trasladar los avances obteni-

dos en laboratorio hacia procesos productivos de mayor envergadura. Esta transición es clave para la valorización masiva de residuos agroalimentarios, contribuyendo tanto a la sostenibilidad ambiental como al fortalecimiento económico de la industria.

En cuanto a sus aplicaciones, resulta fundamental continuar con investigaciones orientadas a la formulación de alimentos más saludables, sostenibles y adaptados a las nuevas necesidades de los consumidores, así como en la creación de envases ecológicos. Asimismo, el ámbito biomédico y farmacéutico exige mayor validación científica que respalde el potencial de la pectina en terapias antitumorales, liberación controlada de fármacos y enfermedades no transmisibles. Finalmente, en el campo ambiental, la pectina ofrece un horizonte promisorio como agente de remediación de metales pesados y contaminantes, que abre nuevas perspectivas de aplicación en el marco de una economía circular.

REFERENCIAS

- Abou, W., Hassan, E. A., & Hassan, M. L. (2021). Extraction of pectin from sugar beet pulp by enzymatic and ultrasound-assisted treatments. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100042. <https://doi.org/10.1016/J.CARPTA.2021.100042>
- Agarwal, T., Costantini, M., & Maiti, T. K. (2021). Extrusion 3D printing with Pectin-based ink formulations: Recent trends in tissue engineering and food manufacturing. *Biomedical Engineering Advances*, 2, 100018. <https://doi.org/10.1016/J.BEA.2021.100018>
- Ahmad, S., Sabir, A., & Khan, S. M. (2023). Synthesis and characterization of pectin/carboxymethyl cellulose-based hybrid hydrogels for heavy metal ions adsorption. *Chemical Papers*, 77(8), 4165–4177. <https://doi.org/10.1007/S11696-023-02767-7/METRICS>
- Ahmed, M. W., Haque, M. A., Mohibullah, M., Khan, M. S. I., Islam, M. A., Mondal, M. H. T., & Ahmmed, R. (2022). A review on active packaging for quality and safety of foods: Current trends, applications, prospects and challenges. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, 100913. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2022.100913>
- Ahsan, M., Ashraf, H., Ihtisham-Ul-Haq, Liaquat, A., Nayik, G. A., Ramniwas, S., Alfarraj, S., Ansari, M. J., & Gere, A. (2024). Exploring pectin from ripe and unripe Banana Peel: A novel functional fat replacers in muffins. *Food Chemistry: X*, 23. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2024.101539>
- Akachat, B., Himed, L., Salah, M., D'Elia, M., Zomorrod, S., Ali, R., Rastrelli, L., & Barkat, M. (2025). Optimization of pectin extraction from lemon peels using hydrochloric acid and response surface methodology. *Applied Food Research*, 5(1), 100948. <https://doi.org/10.1016/J.AFRES.2025.100948>
- Anoraga, S. B., Shamsudin, R., Hamzah, M. H., Sharif, S., Saputro, A. D., & Basri, M. S. M. (2024). Optimization of subcritical water extraction for pectin extraction from cocoa pod husks using the response surface methodology. *Food Chemistry*, 459, 140355. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2024.140355>
- Araújo, M. N. P., Grisi, C. V. B., Duarte, C. R., de Almeida, Y. M. B., & Vinhas, G. M. (2023). Active packaging of corn starch with pectin extract and essential oil of Turmeric Longa Linn: Preparation, characterization and application in sliced bread. *International Journal of Biological Macromolecules*, 226, 1352–1359. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2022.11.248>
- Arora, S., Kataria, P., Ahmad, W., Mishra, R., Upadhyay, S., Dobhal, A., Bisht, B., Hussain, A., Kumar, V., & Kumar, S. (2024). Microwave Assisted Green Extraction of Pectin from Citrus maxima Albedo and Flavedo, Process Optimization, Characterisation and Comparison with Commercial Pectin. *Food Analytical Methods*, 17(1), 105–118. <https://doi.org/10.1007/S12161-023-02547-9>
- 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>
- Assifaoui, A., Hayrapetyan, G., Gallery, C., & Agoda-Tandjawa, G. (2024). Exploring techno-functional properties, synergies, and challenges of pectins: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 7, 100496. <https://doi.org/10.1016/J.CARPTA.2024.100496>
- Bachari, S., Ghaderi-Ghahfarokhi, M., Gavligi, H. A., & Zarei, M. (2024). Ultrasonic depolymerization of pomegranate peel pectin: Effect of sonication time on antioxidant, α -amylase inhibitory, and prebiotic properties. *Food Chemistry: X*, 101901. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2024.101901>
- Basak, S., & Annappure, U. S. (2022). The potential of subcritical water as a “green” method for the extraction and modification of pectin: A critical review. *Food Research International*, 161, 111849. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2022.111849>

- Benito, O., Melgosa, R., Illera, A. E., Sanz, M. T., & Beltrán, S. (2024). Kinetics of extraction and degradation of pectin derived compounds from onion skin wastes in subcritical water. *Food Hydrocolloids*, 153, 109957. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2024.109957>
- 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>
- Benmebarek, I. E., Maqsood, S., Khalid, W., Navaf, M., Rasool, I. F. U., Moreno, A., & Esatbeyoglu, T. (2025). Valorization of agro-industrial waste to produce low-methoxyl pectin and its activation towards more sustainable applications and circular economy. *International Journal of Biological Macromolecules*, 320, 145953. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.145953>
- Bhuiyan, M. H. R., Yeasmen, N., & Ngadi, M. (2025). Effect of food hydrocolloids on 3D meat-analog printing and deep-fat-frying. *Food Hydrocolloids*, 159, 110716. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2024.110716>
- Brezo, T., Švarc, J., Morais, S., Delerue-Matos, C., Rodrigues, F., Lončarević, I., & Pajin, B. (2023). Chemical and Biological Characterisation of Orange (*Citrus sinensis*) Peel Extracts Obtained by Subcritical Water. *Processes* 2023, Vol. 11, Page 1766, 11(6), 1766. <https://doi.org/10.3390/PR11061766>
- Carnaval, L. S., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2024). Agro-Food Waste Valorization for Sustainable Bio-Based Packaging. *Journal of Composites Science* 2024, Vol. 8, Page 41, 8(2), 41. <https://doi.org/10.3390/JCS8020041>
- Çavdaroglu, E., Büyüktaş, D., Farris, S., & Yemenicioğlu, A. (2023). Novel edible films of pectins extracted from low-grade fruits and stalk wastes of sun-dried figs: Effects of pectin composition and molecular properties on film characteristics. *Food Hydrocolloids*, 135, 108136. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2022.108136>
- Chandel, V., Biswas, D., Roy, S., Vaidya, D., Verma, A., & Gupta, A. (2022). Current Advancements in Pectin: Extraction, Properties and Multifunctional Applications. *Foods* 2022, Vol. 11, Page 2683, 11(17), 2683. <https://doi.org/10.3390/FOODS11172683>
- Chen, W., Yuan, S., Shen, J., Chen, Y., & Xiao, Y. (2021). A Composite Hydrogel Based on Pectin/Cellulose via Chemical Cross-Linking for Hemorrhage. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 627351. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2020.627351/BIBTEX>
- Chen, Y., Zhao, T., Cheng, L., Yang, B., & Wen, L. (2024). Degree of methyl esterification: A key factor for the encapsulation of icaritin with pectin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 260, 129361. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.129361>
- Cherian, E., Khadeeja, T. S., Saheersha, K. N., Ashitha, K. S., & Poothicote, N. G. (2024). Investigation into pectin extraction and technological implementations in the food industry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(15), 9102–9110. <https://doi.org/10.1002/JSFA.13638>
- Costa, J. M., Wang, W., Nakasu, P. Y. S., Hu, C., Forster-Carneiro, T., & Hallett, J. P. (2025). Impacts of microwaves on the pectin extraction from apple pomace: Technological properties in structuring of hydrogels. *Food Hydrocolloids*, 160, 110766. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2024.110766>
- Cui, Y., Wang, S., Wang, S., Cao, S., Wang, X., & Lü, X. (2022). Extraction optimization and characterization of persimmon peel pectin extracted by subcritical water. *Food Chemistry: X*, 16, 100486. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2022.100486>
- Dang, G., Li, J., Yin, C., Wang, W., Zhang, K., Zhong, R., Chen, L., Zhang, H., & Schroyen, M. (2025). Deciphering Pectin: A Comprehensive Overview of Its Origins, Processing, and Promising Utility. *ACS Omega*, 10(1), 1–15. https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.4C01843/ASSET/IMAGES/LARGE/AO4C01843_0002.JPEG
- Darkak, M., Alizadeh, A., Roufegarinejad, L., & Hamishehkar, H. (2025). Development of active double-layer film from sunflower by-products: A pectin-based system for chicken freshness monitoring and preservation. *Carbohydrate Polymers*, 366, 123817. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2025.123817>
- De Laet, E., Bernaerts, T., Morren, L., Vanmarcke, H., & Van Loey, A. M. (2025). The Use of Different Cell Wall Degrading Enzymes for Pectin Extraction from Carrot Pomace, in Comparison to and in Combination with an Acid Extraction. *Foods*, 14(3), 435. <https://doi.org/10.3390/FOODS14030435/S1>
- De Laet, E., Bernaerts, T., Núñez Ares, J., De Cock, K., Goos, P., & Van Loey, A. M. (2024). Influence of ultrasound-assisted extraction on the pectin extraction yield and structural characteristics: A case study on carrot pomace (*Daucus carota*). *Food and Bioproducts Processing*, 148, 309–320. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2024.09.011>
- 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>
- Dirpan, A., Deliana, Y., Ainani, A. F., Irwan, & Bahmid, N. A. (2024). Exploring the Potential of Pectin as a Source of Biopolymers for Active and Intelligent Packaging: A Review. *Polymers* 2024, Vol. 16, Page 2783, 16(19), 2783. <https://doi.org/10.3390/POLYM16192783>
- 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). <https://doi.org/10.1016/J.HELLYON.2023.E20212/ASSET/638AF1B1-9E88-4983-AACB-C461D3FFBCB3/MAIN.ASSETS/GR16.JPG>
- 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>
- Dranca, F., Vargás, M., & Oroian, M. (2020). Physicochemical properties of pectin from *Malus domestica* 'Fálticeni' apple pomace as affected by non-conventional extraction techniques. *Food Hydrocolloids*, 100, 105383. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2019.105383>
- Drishya, C., & Wani, K. M. (2024). Exploring muskmelon peel as a novel source of pectin: Extraction methods and applications. *Food and Humanity*, 3, 100331. <https://doi.org/10.1016/J.FOOHUM.2024.100331>
- Duan, X., Zhu, Y., Shu, C., Gao, J., Liu, F., & Pan, S. (2022). Extraction of Pectin from Satsuma Mandarin Peel: A Comparison of High Hydrostatic Pressure and Conventional Extractions in Different Acids. *Molecules* 2022, Vol. 27, Page 3747, 27(12), 3747. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27123747>
- 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, P., Swetha, S., Stanley, A., Antony, V. 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>
- Emran, T. Bin, Islam, F., Mitra, S., Paul, S., Nath, N., Khan, Z., Das, R., Chandran, D., Sharma, R., Lima, C. M. G., Awadh, A. A. Al, Almazni, I. A., Alhasaniah, A. H., & Guiné, R. P. F. (2022). Pectin: A Bioactive Food Polysaccharide with Cancer Preventive Potential. *Molecules* 2022, Vol. 27, Page 7405, 27(21), 7405. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27217405>
- 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>
- Freitas, C. M. P., Coimbra, J. S. R., Souza, V. G. L., & Sousa, R. C. S. (2021). Structure and Applications of Pectin in Food, Biomedical, and Pharmaceutical Industry: A Review. *Coatings* 2021, Vol. 11, Page 922, 11(8), 922. <https://doi.org/10.3390/COATINGS11080922>
- Frosi, I., Balduzzi, A., Moretto, G., Colombo, R., & Papetti, A. (2023). Towards Valorization of Food-Waste-Derived Pectin: Recent Advances on Their Characterization and Application. *Molecules* 2023, Vol. 28, Page 6390, 28(17), 6390. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28176390>
- Fu, X., Chang, X., Ding, Z., Xu, H., Kong, H., Chen, F., Wang, R., Shan, Y., & Ding, S. (2022). Fabrication and Characterization of Eco-Friendly Polyelectrolyte Bilayer Films Based on Chitosan and Different Types of Edible Citrus Pectin. *Foods* 2022, Vol. 11, Page 3536, 11(21), 3536. <https://doi.org/10.3390/FOODS11213536>
- Fu, X., Chang, X., Xu, S., Xu, H., Ge, S., Xie, Y., Wang, R., Xu, Y., Luo, Z., Shan, Y., & Ding, S. (2024). Development of a chitosan/pectin-based multi-active food packaging with both UV and microbial defense functions for effectively preserving of strawberry. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254, 127968. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.127968>
- Gerschenson, L. N., Fissore, E. N., Rojas, A. M., Idrovo Encalada, A. M., Zukowski, E. F., & Higuera Coelho, R. A. (2021). Pectins obtained by ultrasound from agroindustrial by-products. *Food Hydrocolloids*, 118, 106799. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2021.106799>

- Ghnim, Z. S., Adhab, A. H., Altalbawy, F. M. A., Salih Mahdi, M., Salah Mansoor, A., Radi, U. K., Saadoun Abd, N., Abdul-Reda Hussein, U., Hussain Hamza, H., Muzammil, K., & Alkhayyat, A. (2025). Novel pectin/chitosan MOF hydrogel for dye adsorption and pathogenic bacteria inhibition. *Frontiers in Materials*, 12, 1535825. <https://doi.org/10.3389/FMATS.2025.1535825/BIBTEX>
- Golub, N., Galić, E., Radić, K., Smigic, N., Djekić, I., Pedisić, S., & Čepo, D. V. (2025). Microwave-Assisted Valorization of Tomato Pomace for Pectin Recovery: Improving Yields and Environmental Footprint. *Foods*, 14(9), 1516. <https://doi.org/10.3390/FOODS14091516/S1>
- Gonzalez, D. J., Benmebarek, I. E., Hadidi, M., Bechtner, J. D., Martinez, M. M., Cabañas, B., & Moreno, A. (2025). Optimization of microwave-assisted hydrothermal extraction of homogalacturonan-rich, low methoxyl pectin from discarded garlic peels: Comparative macromolecular and functional analysis with conventional extraction. *Food Hydrocolloids*, 166, 111324. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2025.111324>
- Guo, Z., Ge, X., Li, W., Yang, L., Han, L., & Yu, Q. li. (2021). Active-intelligent film based on pectin from watermelon peel containing beetroot extract to monitor the freshness of packaged chilled beef. *Food Hydrocolloids*, 119, 106751. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2021.106751>
- Gurev, A., Cesko, T., Dragancea, V., Ghendov-Mosanu, A., Pintea, A., & Sturza, R. (2023). Ultrasound- and Microwave-Assisted Extraction of Pectin from Apple Pomace and Its Effect on the Quality of Fruit Bars. *Foods* 2023, Vol. 12, Page 2773, 12(14), 2773. <https://doi.org/10.3390/FOODS12142773>
- Hadidi, M., Tarahi, M., McClements, D. J., & Aghababaei, F. (2025). Unlocking the potential of deep eutectic solvents for sustainable pectin extraction. *Carbohydrate Polymers*, 362, 123683. <https://doi.org/10.1016/J.CARB-POL.2025.123683>
- 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* 2025, Vol. 12, Page 65, 12(3), 65. <https://doi.org/10.3390/SEPARATIONS12030065>
- Hennessey, L., Murillo, W., Vasco, J., & Astudillo, I. C. P. (2021). Enzymatic Extraction and Characterization of Pectin from Cocoa Pod Husks (*Theobroma cacao* L.) Using Celluclast® 1.5 L. *Molecules* 2021, Vol. 26, Page 1473, 26(5), 1473. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26051473>
- 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.MEAFOO.2024.100135>
- Huang, K., Wang, L., Deng, Y., Zheng, H., Wu, S., Li, Z., Lei, H., Yu, Q., & Guo, Z. (2024). Development of amine-sensitive intelligent film with MIL-100(Fe) as function filler based on anthocyanins/pectin for monitoring chilled meat freshness. *International Journal of Biological Macromolecules*, 270, 132463. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIO-MAC.2024.132463>
- Íñiguez, M., Pizaña, J. J. P., Ramírez, D., Ramírez, C. A., Araújo, R. G., Flores, E. A., Iqbal, H. M. N., Parra, R., & Melchor, 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.IJBIO-MAC.2024.130230>
- Jiang, H., Zhang, W., Pu, Y., Chen, L., Cao, J., & Jiang, W. (2023). Development and characterization of a novel active and intelligent film based on pectin and betacyanins from peel waste of pitaya (*Hylocereus undatus*). *Food Chemistry*, 404, 134444. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.134444>
- Kanatt, S. R. (2024). Pectin From Fruit Peel Waste: A Sustainable Source for Production of Active Packaging Films. *Packaging Technology and Science*, 37(6), 487–501. <https://doi.org/10.1002/PTS.2803;REQUESTEDJOURNAL:-JOURNAL:10991522;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Karbuz, 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>
- Kedir, W. M., Deresa, E. M., & Diriba, T. F. (2022). Pharmaceutical and drug delivery applications of pectin and its modified nanocomposites. *Heliyon*, 8(9). <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2022.E10654/ASSET/DDE73ADD-8CEE-470F-9309-581FE17867B6/MAIN.ASSETS/GR2.JPG>
- Khalil, R. K. S., Sharaby, M. R., & Abdelrahim, D. S. (2023). Novel active edible food packaging films based entirely on citrus peel wastes. *Food Hydrocolloids*, 134, 107961. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2022.107961>
- 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>

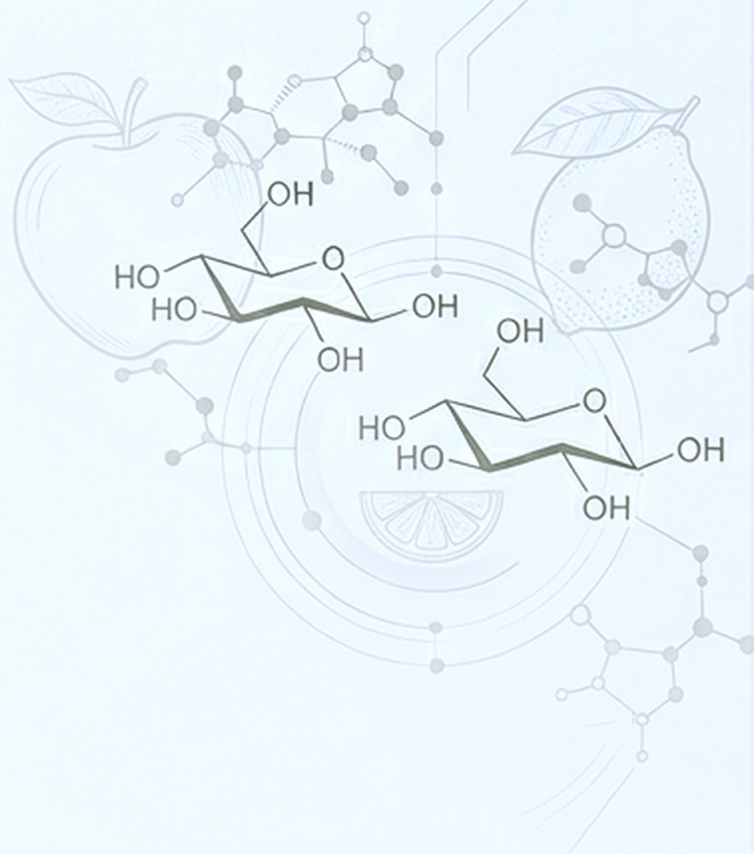
- Lasunon, P., & Sengkhamparn, N. (2022). Effect of Ultrasound-Assisted, Microwave-Assisted and Ultrasound-Microwave-Assisted Extraction on Pectin Extraction from Industrial Tomato Waste. *Molecules* 2022, Vol. 27, Page 1157, 27(4), 1157. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27041157>
- Lei, Y., Yao, Q., Jin, Z., & Wang, Y. C. (2023). Intelligent films based on pectin, sodium alginate, cellulose nanocrystals, and anthocyanins for monitoring food freshness. *Food Chemistry*, 404, 134528. <https://doi.org/10.1016/J.FOOD-CHEM.2022.134528>
- Ling, B., Ramaswamy, H. S., Lyng, J. G., Gao, J., & Wang, S. (2023). Roles of physical fields in the extraction of pectin from plant food wastes and byproducts: A systematic review. *Food Research International*, 164, 112343. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2022.112343>
- Liu, W., Li, M., Lin, S., Shi, T., Nakamura, Y., Song, L., & Tang, Y. (2025). Gastrointestinal dynamics and glycemic modulation of benzyl isothiocyanate-loaded fish skin gelatin-pectin emulsions: A comprehensive in vitro and in vivo analysis. *Food Research International*, 220, 117026. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2025.117026>
- Liu, Y., Cheng, Y., Yu, X., Zhu, J., Chen, K., Kuang, Y., Wu, K., & Jiang, F. (2024). Konjac glucomannan films incorporated pectin-stabilized Mandarin oil emulsions: Structure, properties, and application in fruit preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 267, 131292. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.131292>
- 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>
- Mahmud, M. M., Belal, M., Ahmed, S., Hoque, M. M., & Zzaman, W. (2021). Microwave-assisted extraction and characterization of pectin from citrus fruit wastes for commercial application. *Food Research*, 5(5), 80–88. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(5\).592](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(5).592)
- Mamiru, D., & Gonfa, G. (2023). Extraction and characterization of pectin from watermelon rind using acetic acid. *Helvion*, 9(2), e13525. <https://doi.org/10.1016/J.HELIVON.2023.E13525>
- Mao, Y., Robinson, J. P., & Binner, E. R. (2023). Current status of microwave-assisted extraction of pectin. *Chemical Engineering Journal*, 473, 145261. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2023.145261>
- Mellinas, C., Solaberrieta, I., Pelegrín, C. J., Jiménez, A., & Garrigós, M. C. (2022). Valorization of Agro-Industrial Wastes by Ultrasound-Assisted Extraction as a Source of Proteins, Antioxidants and Cutin: A Cascade Approach. *Antioxidants*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/ANTIOX11091739>
- Mirpoor, S. F., Corrado, I., Di Girolamo, R., Dal Poggetto, G., Panzella, L., Borselleca, E., Pezzella, C., & Giosafatto, C. V. L. (2023). Manufacture of active multilayer films made of functionalized pectin coated by polyhydroxyalkanoates: A fully renewable approach to active food packaging. *Polymer*, 281, 126136. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2023.126136>
- Mobasserfar, R., Shiri, A., Mofid, V., Noghabi, M. S., & Gharibzadeh, S. M. T. (2025). Optimizing, characterizing, and unveiling of functional properties and structure of grape pomace pectin obtained by a sequential ultrasound-microwave extraction. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(6), 8621–8634. <https://doi.org/10.1007/S13399-024-05676-1/METRICS>
- Mohrazi, A., & Ghasemi-Fasaei, R. (2023). Removal of methylene blue dye from aqueous solution using an efficient chitosan-pectin bio-adsorbent: kinetics and isotherm studies. *Environmental Monitoring and Assessment* 2023 195:2, 195(2), 1–19. <https://doi.org/10.1007/S10661-022-10900-4>
- Namasivayam, S., Samrat, K., Arvind, B. R. S., Kaviriri, M., John, F. K., & Meivelu Moovendhan. (2024). Pectin-nano zero valent iron nanocomposites for efficient heavy metal removal and bactericidal action against waterborne pathogens — Innovative green solution towards environmental sustainability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 277, 133990. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.133990>
- Nandal, K., & Jindal, R. (2025a). Efficient removal of Eosin B and Bismarck Brown dyes through microwave-assisted synthesis of pectin- and pullulan-based hydrogel. *Polymer Bulletin*, 82(12), 7023–7055. <https://doi.org/10.1007/S00289-025-05815-2/METRICS>
- Nandal, K., & Jindal, R. (2025b). Enhanced dye adsorption via pectin/pullulan/kaolinite nanocomposite for wastewater treatment applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 319, 145557. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.145557>
- 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>

- Nithish, S., Kumar, R. P., Rawat, L. K., Afzia, N., & Ghosh, T. (2025). Extraction of pectin from Assam lemon (*Citrus limon*) peel and its use in preparation of low-fat mayonnaise. *Sustainable Food Technology*, 3(4), 1128–1135. <https://doi.org/10.1039/D4FB00333K>
- Nordin, N. N., Aziz, N. K., Naharudin, I., & Anuar, N. K. (2022). Effects of Drug-Free Pectin Hydrogel Films on Thermal Burn Wounds in Streptozotocin-Induced Diabetic Rats. *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 2873, 14(14), 2873. <https://doi.org/10.3390/POLYM14142873>
- Oloye, M. T., Jabar, J. M., Adetuyi, A. O., & Lajide, L. (2023). Extraction and characterization of pectin from fruit peels of *Irvingia gabonensis* and pulp of *Cola milleni* and *Theobroma cacao* as precursor for industrial applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(3), 2125–2133. <https://doi.org/10.1007/S13399-021-01366-4>
- 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>
- Peighambardoust, S., Jafarzadeh, M., Pateiro, M., Lorenzo, J. M., & Domínguez, R. (2021). Physicochemical, Thermal and Rheological Properties of Pectin Extracted from Sugar Beet Pulp Using Subcritical Water Extraction Process. *Molecules* 2021, Vol. 26, Page 1413, 26(5), 1413. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26051413>
- Pereira, D. T. V., Méndez-Albiñana, P., Mendiola, J. A., Villamiel, M., Cifuentes, A., Martínez, J., & Ibáñez, E. (2024). An eco-friendly extraction method to obtain pectin from passion fruit rinds (*Passiflora edulis* sp.) using subcritical water and pressurized natural deep eutectic solvents. *Carbohydrate Polymers*, 326, 121578. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2023.121578>
- Pholsin, R., Shiekh, K. A., Jafari, S., Kijpatanasilp, I., Na Nan, T., Suppavorasatit, I., & Assatarakul, K. (2024). Impact of pectin edible coating extracted from cacao shell powder on postharvest quality attributes of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit during storage. *Food Control*, 155, 110023. <https://doi.org/10.1016/J.FOOD-CONT.2023.110023>
- Prado-Acebo, I., Cubero-Cardoso, J., Lu-Chau, T. A., & Eibes, G. (2024). Integral multi-valORIZATION of agro-industrial wastes: A review. *Waste Management*, 183, 42–52. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2024.05.001>
- Priyadarshi, R., Kim, S. M., & Rhim, J. W. (2021). Pectin/pullulan blend films for food packaging: Effect of blending ratio. *Food Chemistry*, 347. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129022>
- 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>
- 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.INDCROP.2025.120895>
- Rawat, S., Pavithra, T., & Sunil, C. K. (2024). Citrus byproduct valorization: pectin extraction, characterization, and research advances in biomaterial derivation for applications in active film packaging. *Discover Food* 2024 4:1, 4(1), 1–33. <https://doi.org/10.1007/S44187-024-00238-W>
- Resende, L. M., & Franca, A. S. (2022). Jabuticaba (*Plinia* sp.) Peel as a Source of Pectin: Characterization and Effect of Different Extraction Methods. *Foods* 2023, Vol. 12, Page 117, 12(1), 117. <https://doi.org/10.3390/FOODS12010117>
- 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>
- Riyamol, N., Gada Chengaiyan, J., Rana, S. S., Ahmad, F., Haque, S., & Capanoglu, E. (2023). Recent Advances in the Extraction of Pectin from Various Sources and Industrial Applications. *ACS Omega*, 8(49), 46309–46324. https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.3C04010/ASSET/IMAGES/LARGE/AO3C04010_0004.JPEG
- Rodsamran, P., & Sothornvit, R. (2019). Microwave heating extraction of pectin from lime peel: Characterization and properties compared with the conventional heating method. *Food Chemistry*, 278, 364–372. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.11.067>
- Roman, A., Contador, C. A., Li, M. W., Lam, H. M., Ah-Hen, K., Ulloa, P. E., & Ravanal, M. C. (2023). Pectin: An overview of sources, extraction and applications in food products, biomedical, pharmaceutical and environmental issues. *Food Chemistry Advances*, 2, 100192. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHA.2023.100192>

- Said, N. S., & Lee, W. Y. (2025). Pectin-Based Active and Smart Film Packaging: A Comprehensive Review of Recent Advancements in Antimicrobial, Antioxidant, and Smart Colorimetric Systems for Enhanced Food Preservation. *Molecules* 2025, Vol. 30, Page 1144, 30(5), 1144. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES30051144>
- Said, N. S., Olawuyi, I. F., Cho, H. S., & Lee, W. Y. (2023). Novel edible films fabricated with HG-type pectin extracted from different types of hybrid citrus peels: Effects of pectin composition on film properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 127238. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.127238>
- Salehi, F., Behboudi, H., Kavosi, G., & Ardestani, S. K. (2018). Oxidative DNA damage induced by ROS-modulating agents with the ability to target DNA: A comparison of the biological characteristics of citrus pectin and apple pectin. *Scientific Reports* 2018 8:1, 8(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32308-2>
- Sengar, A. S., Rawson, A., Muthiah, M., & Kalakandan, S. K. (2020). Comparison of different ultrasound assisted extraction techniques for pectin from tomato processing waste. *Ultrasonics Sonochemistry*, 61, 104812. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2019.104812>
- Shah, Y. A., Bhatia, S., Al-Harrasi, A., Afzaal, M., Saeed, F., Anwer, M. K., Khan, M. R., Jawad, M., Akram, N., & Faisal, Z. (2023). Mechanical Properties of Protein-Based Food Packaging Materials. *Polymers* 2023, Vol. 15, Page 1724, 15(7), 1724. <https://doi.org/10.3390/POLYM15071724>
- Shao, Z., Lu, J., Ding, J., Fan, F., Sun, X., Li, P., Fang, Y., & Hu, Q. (2021). Novel green chitosan-pectin gel beads for the removal of Cu(II), Cd(II), Hg(II) and Pb(II) from aqueous solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 176, 217–225. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.02.037>
- Sharifi, A., Hamidi-Esfahani, Z., Ahmadi Gavlighi, H., & Saberian, H. (2022). Assisted ohmic heating extraction of pectin from pomegranate peel. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 172, 108760. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2021.108760>
- Sharma, S., Wani, K. M., Mujahid, S. M., Jayan, L. S., & Rajan, S. S. (2025). Review on Pectin: Sources, Properties, Health Benefits and Its Applications in Food Industry. *Journal of Future Foods*, 6(2), 205–219. <https://doi.org/10.1016/J.JFUTFO.2024.04.009>
- 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. *International Journal of Biological Macromolecules*, 307, 141905. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.141905>
- Sindhu, O., Chandrababha, 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>
- Singhal, S., & Swami, N. R. (2022). Citrus pectins: Structural properties, extraction methods, modifications and applications in food systems – A review. *Applied Food Research*, 2(2), 100215. <https://doi.org/10.1016/J.AFRES.2022.100215>
- Song, Z., Wei, J., Cao, Y., Yu, Q., & Han, L. (2023). Development and characterization of tapioca starch/pectin composite films incorporated with broccoli leaf polyphenols and the improvement of quality during the chilled mutton storage. *Food Chemistry*, 418, 135958. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2023.135958>
- Soomro, M. A., Khan, S., Majid, A., Bhatti, S., Perveen, S., & Phull, A. R. (2024). Pectin as a biofunctional food: comprehensive overview of its therapeutic effects and antidiabetic-associated mechanisms. *Discover Applied Sciences* 2024 6:6, 6(6), 1–24. <https://doi.org/10.1007/S42452-024-05968-1>
- Spinei, M., & Oroian, M. (2023). Structural, functional and physicochemical properties of pectin from grape pomace as affected by different extraction techniques. *International Journal of Biological Macromolecules*, 224, 739–753. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2022.10.162>
- Sudharsan, M. S., Mani, H., Kumar, L., Pazhamalai, V., & Hari, S. (2023). Pectin based Colorimetric Film for Monitoring Food Freshness. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 11(3), 941–953. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.11.3.03>
- Suleiman, J., Shamsudin, R., Hamzah, M. H., Basri, M. S. M., & Jimoh, K. A. (2025). Extraction optimization and characterization of durian (*Durio zibethinus*) rind pectin extracted by subcritical water. *Food Chemistry*, 474, 143123. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2025.143123>
- Taheri, A., Ahari, H., Mashak, Z., & Jafari, S. M. (2024). Monitor the freshness of shrimp by smart halochromic films based on gelatin/pectin loaded with pistachio peel anthocyanin nanoemulsion. *Food Chemistry: X*, 21, 101217. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2024.101217>

- Talha, M., Khalid, S., Maan, A. A., Tanveer, N., Khan, M. K. I., Asif, M., Arif, S., & Sarwar, A. (2024). Ohmic assisted extraction: a sustainable and environment friendly approach to substitute conventional extraction methods. *Food Reviews International*, 40(10), 3508–3529. <https://doi.org/10.1080/87559129.2024.2366841>;SUBPAGE:STRIN-G:ACCESS
- Tavassoli, M., Khezerlou, A., Moghaddam, T. N., Firoozy, S., Bakhshizadeh, M., Sani, M. A., Hashemi, M., Ehsani, A., & Lorenzo, J. M. (2023). Sumac (*Rhus coriaria* L.) anthocyanin loaded-pectin and chitosan nanofiber matrices for real-time monitoring of shrimp freshness. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242, 125044. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.125044>
- Thammawong, W., Chanshotikul, N., Sriutha, M., Kwantrairat, S., & Hemung, B. O. (2025). Utilization of a hydrogel made from mixed pectin/fish bone powder as a fat replacer in beef patty. *Applied Food Research*, 5(2), 101067. <https://doi.org/10.1016/J.AFRES.2025.101067>
- 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>
- Tong, W. Y., Ahmad Rafiee, A. R., Leong, C. R., Tan, W. N., Dailin, D. J., Almarhoon, Z. M., Shelkh, M., Nawaz, A., & Chuah, L. F. (2023). Development of sodium alginate-pectin biodegradable active food packaging film containing cinnamic acid. *Chemosphere*, 336, 139212. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.139212>
- Tran, N. T. K., Nguyen, V. B., Tran, T. Van, & Nguyen, T. T. T. (2023). Microwave-assisted extraction of pectin from jackfruit rags: Optimization, physicochemical properties and antibacterial activities. *Food Chemistry*, 418, 135807. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2023.135807>
- Tran, T., Saifullah, M., Nguyen, N. H., Nguyen, M. H., & Vuong, Q. V. (2021). Comparison of ultrasound-assisted and conventional extraction for recovery of pectin from Gac (*Momordica cochinchinensis*) pulp. *Future Foods*, 4, 100074. <https://doi.org/10.1016/J.FUFO.2021.100074>
- Tunç, M. T., & Odabaş, H. İ. (2021). Single-step recovery of pectin and essential oil from lemon waste by ohmic heating assisted extraction/hydrodistillation: A multi-response optimization study. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 74, 102850. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2021.102850>
- Turan, O., İsci, A., Yılmaz, 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>
- Van Hung, P., Anh, M. N. T., Hoa, P. N., & Phi, N. T. L. (2021). Extraction and characterization of high methoxyl pectin from *Citrus maxima* peels using different organic acids. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(2), 1541–1546. <https://doi.org/10.1007/S11694-020-00748-Y>;METRICS
- 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, 128663. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.128663>
- Wang, D., Wang, B., Jin, X., Peng, Y., Zhao, J., Zhang, M., Wei, Y., Long, Z., & Chen, Q. (2024). Microwave-enzyme-assisted extraction of pectin from feijoa (*Acca sellowiana*) fruit: Extraction optimization, physicochemical and functional properties. *LWT*, 204, 116445. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2024.116445>
- Wang, R., Xu, Z., Jiang, D., Xiong, X., Li, Y., & Li, X. (2025). Optimization of ohmic heating extraction of pectin from apple pomace and comparison with conventional method. *Food and Bioprocess Technology*, 151, 231–241. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2025.03.010>
- 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>
- Wedamulla, N. E., Fan, M., Choi, Y. J., & Kim, E. K. (2023). Effect of pectin on printability and textural properties of potato starch 3D food printing gel during cold storage. *Food Hydrocolloids*, 137, 108362. <https://doi.org/10.1016/J>

- Xie, J., Bi, J., Liu, X., Blecker, C., Jacquet, N., & Lyu, J. (2025). Development of soy protein isolate-chelator soluble pectin composite gels as extrusion-based 3D food printing inks: Effects of mingling strategy. *Food Hydrocolloids*, 162, 110904. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2024.110904>
- Xie, Q., Liu, X., Zhang, Y., & Liu, G. (2023). Development and characterization of a new potato starch/watermelon peel pectin composite film loaded with TiO₂ nanoparticles and microencapsulated Lycium barbarum leaf flavonoids and its use in the Tan mutton packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 252, 126532. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.126532>
- Yang, Y., Zhang, W., Ai, B., Zheng, L., Zheng, X., Xiao, D., Sheng, Z., Yang, J., & Wang, S. (2025). Passion fruit peel-derived low-methoxyl pectin: De-esterification methods and application as a fat substitute in set yogurt. *Carbohydrate Polymers*, 347, 122664. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2024.122664>
- Yang, Z., Zhang, Y., Jin, G., Lei, D., & Liu, Y. (2024). Insights into the impact of modification methods on the structural characteristics and health functions of pectin: A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 261 (Pt 2). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129851>
- Yi, L., Cheng, L., Yang, Q., Shi, K., Han, F., Luo, W., & Duan, S. (2024). Source, Extraction, Properties, and Multifunctional Applications of Pectin: A Short Review. *Polymers* 2024, Vol. 16, Page 2883, 16(20), 2883. <https://doi.org/10.3390/POLYM16202883>
- 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* 2024 14:1, 14(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59760-7>
- Yu, Y., Wang, Y., Liu, X., Liu, Y., Ji, L., Zhou, Y., & Sun, L. (2021). Comparison of Analytical Methods for Determining Methylesterification and Acetylation of Pectin. *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 4461, 11(10), 4461. <https://doi.org/10.3390/APP11104461>
- Zakaria, N. A., Abd Rahman, N. H., Rahman, R. A., Zaidel, D. N. A., Hasham, R., Illias, 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>
- Zeng, F., Ye, Y., Liu, J., & Fei, P. (2023). Intelligent pH indicator composite film based on pectin/chitosan incorporated with black rice anthocyanins for meat freshness monitoring. *Food Chemistry: X*, 17, 100531. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2022.100531>
- Zhang, A., Yang, B., Xu, S., Liu, K., Dong, H., Pan, J., Liao, W., Yang, X., & He, Q. (2025). Emulsion gels based on soy protein–pectin complexes as fat replacers: Enhancing pork sausage quality through structural and molecular insights. *International Journal of Biological Macromolecules*, 321, 146331. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.146331>
- Zhang, M., Huang, Y., Lai, H., Zhang, H., Li, G., Dai, X., Yang, Q., Liu, C., Zhang, L., & Zhang, X. (2025). Extraction of *Citrus maxima* (Burm.) peel oil and pectin via acidic deep eutectic solvents: Storage effects and RSM optimization. *Industrial Crops and Products*, 234, 121521. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2025.121521>
- Zhao, H., Zhang, Y., Zhou, C., Zhang, C., & Liu, B. (2023). Engineering pH responsive carboxyethyl chitosan and oxidized pectin-based hydrogels with self-healing, biodegradable and antibacterial properties for wound healing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 127364. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.127364>
- Zheng, J., Li, H., Wang, D., Li, R., Wang, S., & Ling, B. (2021). Radio frequency assisted extraction of pectin from apple pomace: Process optimization and comparison with microwave and conventional methods. *Food Hydrocolloids*, 121, 107031. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2021.107031>
- Zhou, Z., Wang, Z., Liu, X., Zhao, Z., An, H., Wang, Y., He, Y., & Qin, J. (2022). Pectin-based self-healing hydrogel through acylhydrazone connection for controlled drug release and enhanced tumor therapy. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 70, 103210. <https://doi.org/10.1016/J.JDDST.2022.103210>
- 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>



ISBN: 978-612-99147-8-7



2026 - Todos los derechos reservados
<https://fondoeditorial.unaat.edu.pe>

