

Aprovechamiento de Cáscaras de Mango para la Obtención de Pectina: Optimización del Proceso y Evaluación Fisicoquímica

Valorization of Mango Peels for Pectin Production: Process Optimization and Physicochemical Evaluation

Zárate Castillo G.^{1,2}, Damián Hernández X.^{1,2}, Chávez Portillo M.³, Soto Reyes N.^{4,5}, Ruiz López I.I.² y Martínez Ramos T.^{5*}

¹Programa de Ingeniería en Alimentos, Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz (UTCV).

²Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

³Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

⁴Departamento de Alimentos, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato.

⁵Programa de Ingeniería en Biotecnología, Universidad Politécnica Metropolitana de Puebla (UPMP).

*tania.martinez@metropoli.edu.mx

RESUMEN:

Los residuos agroindustriales constituyen un recurso sostenible y de bajo costo para la obtención de compuestos bioactivos y a su vez representan una problemática ambiental. La obtención de pectina a partir de cáscara de mango puede contribuir a una economía circular en el sector agroindustrial, mitigando el problema de su disposición final al aprovechar este subproducto. Se realizó la obtención de pectina de cáscara de mango mediante la extracción con una solución de ácido cítrico 0.1 M y en una relación sólido líquido 1:20. Para identificar el efecto de la temperatura (60, 75 y 90°C), y tiempo (30, 60 y 90 min) sobre el rendimiento, se empleó un diseño factorial 3². Se determinó que en todos los tratamientos se obtuvo pectina de alto metoxilo; de acuerdo con el modelo de regresión las condiciones óptimas de extracción son a 75°C y 90 min, con lo cual se obtuvo un rendimiento del 26.34%, para estas condiciones el grado de esterificación (GE) de la pectina extraída fue de 92.37%, y la capacidad de retención de agua (CRA) y aceite (CRAC) fueron de 1.12 ± 0.04 g/g y 2.07 ± 0.16 g/g respectivamente. La pectina extraída tiene potencial para ser agente espesante, gelificante y estabilizante.

PALABRAS CLAVE: Pectina, Química verde, Grado de esterificación, Capacidad de Retención de Agua, Capacidad de Retención de Aceite.

ABSTRACT:

Agro-industrial residues constitute a sustainable, low-cost resource for obtaining bioactive compounds, while also representing an environmental problem. In this context, extracting pectin from mango peels would contribute to establishing a circular economy in the agro-industrial sector, as it would mitigate disposal issues by valorizing these by-products. Pectin was obtained from mango peels by extraction with a 0.1 M citric acid solution at a solid-to-liquid ratio of 1:20. To identify the effect of temperature (60, 75, and 90°C) and time (30, 60, and 90 min) on the yield, a 3² factorial design was used. It was found that high-methoxyl pectin was obtained in all treatments; according to the regression model, the optimal extraction conditions were 75°C and 90 min, with which a yield of 26.34% was obtained. Under these conditions, the degree of esterification (DE) of the extracted pectin was 92.37%, and the water retention capacity (WRC) and oil retention capacity (ORC) were 1.12 ± 0.04 g/g and 2.07 ± 0.16 g/g, respectively. The extracted pectin has potential to be a thickening, gelling, and stabilizing agent.

KEYWORDS: Pectin, Green Chemistry, Degree of Esterification, Water Holding Capacity, Oil Holding Capacity.

INTRODUCCIÓN

En México, la producción de frutas representa una de las actividades económicas más importantes a nivel nacional, al representar el 8.83% del PIB. México es uno de los mayores productores de mango a nivel internacional, en el año 2020 la producción mundial de mango fue de 60.65 millones de toneladas, de las cuales México aportó 2.37 millones, ubicándose como el cuarto productor a nivel global (Martínez-Hernández *et al.*, 2025). Además de consumirse fresco, el mango se procesa a nivel industrial para la obtención de pulpa, puré, mermelada, jalea, así como productos congelados, enlatados y deshidratados (Saravanan & Jeevitha, 2024). Por otra parte, el crecimiento de la población mundial y los cambios en los patrones de consumo han incrementado la producción industrial de alimentos, generando grandes volúmenes de residuos agroindustriales como cáscaras, semillas y otras fracciones no comestibles. Estos subproductos representan una pérdida importante de compuestos bioactivos valiosos y, al ser dispuestos en vertederos, su descomposición anaeróbica contribuye a la emisión de metano, agravando la huella ambiental del sector (Şen *et al.*, 2024). No obstante, su bajo costo, abundancia y carácter renovable los convierten en materias primas atractivas para la recuperación de componentes de interés. En este contexto, la valorización de residuos agroindustriales se ha convertido en una estrategia clave para reducir la contaminación y promover la economía circular (Saravanan & Jeevitha, 2024).

Los subproductos del procesamiento de frutas destacan por su contenido en compuestos bioactivos y biopolímeros como la pectina (Turan *et al.*, 2024; Muslu Can *et al.*, 2024). La pectina es un heteropolisacárido presente en la pared celular de los vegetales, constituido principalmente por unidades de ácido D-galacturónico unidas mediante enlaces glucosídicos $\alpha(1\rightarrow4)$, las cuales pueden estar parcialmente metiladas y/o acetiladas, además de presentar regiones ramificadas como los ramnogalacturonanos tipo I y II (Pacheco *et al.*, 2022). Su funcionalidad está estrechamente relacionada con su grado de esterificación (GE), parámetro que determina sus propiedades gelificantes. Las pectinas de alto metoxilo (GE > 50%) son especialmente valoradas por su capacidad espesante, gelificante y emulsionante, lo que favorece su aplicación en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética (Shubhangi *et al.*, 2026). Tradicionalmente, la pectina se obtiene a partir de subproductos como cáscaras de cítricos y pulpa de manzana; sin embargo, la búsqueda de nuevas fuentes ha impulsado el estudio de otros residuos agroindustriales. En este sentido, el mango (*Mangifera indica* L.) es una materia prima de gran interés, ya que durante su procesamiento se generan cantidades considerables de residuos, principalmente cáscara y semilla. La cáscara, que representa aproximadamente el 15% del fruto, contiene fibra y compuestos bioactivos que la convierten en una fuente potencial para la obtención de pectina (Pacheco-Jiménez *et al.*, 2024). No obstante, este subproducto suele ser desaprovechado y destinado a compostaje o desecho, lo que limita su aprovechamiento integral. Por otra parte, los métodos convencionales de extracción de pectina utilizan ácidos inorgánicos, como el ácido clorhídrico o sulfúrico, que pueden generar impactos ambientales y afectar la estructura del biopolímero. Por ello, en años recientes se ha promovido el uso de ácidos orgánicos, como el ácido cítrico, así como la optimización de variables de proceso como la temperatura y el tiempo de extracción, con el fin de mejorar el rendimiento y preservar las propiedades funcionales de la pectina. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la temperatura y el tiempo de extracción empleando una solución de ácido cítrico 0.1 M como medio de extracción, mediante un diseño experimental 3^2 , con el fin de determinar las condiciones óptimas que permitan maximizar el rendimiento de pectina a partir de cáscaras de mango, contribuyendo así a la valorización de este subproducto agroindustrial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección y preparación de la cáscara de mango

Los mangos variedad manila (*M. indica* L.) se adquirieron en un mercado local de Puebla, México. Las cáscaras se deshidrataron en un horno (RIOSSA, H-41, México) a 50°C hasta alcanzar un peso constante; posteriormente, se molieron y tamizaron hasta obtener un tamaño de partícula $\leq 500 \mu\text{m}$. El polvo de cáscara de mango se almacenó en un recipiente con cierre hermético y se mantuvo en la oscuridad hasta su uso.

Extracción de pectina con ácido cítrico

El proceso de extracción se realizó mezclando 2.5 g de polvo de cáscara de mango con 50 mL de una solución de ácido cítrico 0.1 M (pH=1.8). La extracción se llevó a cabo a diferentes temperaturas (60-90 °C) y tiempos (30-90 min) de extracción, a 1000 rpm en una parrilla de agitación (SP88854100, Thermo Scientific Digital, EE. UU.). La selección de los intervalos experimentales de temperatura y tiempo se definieron con base en estudios previamente reportados en la literatura (Saravanan *et al.*, 2024; Şen *et al.*, 2024; Gemechu *et al.*, 2024). Posteriormente, se centrifugó (SOLBAT, C-40, México) a 3,500 rpm durante 20 min; se recuperó el sobrenadante y se descartaron los sólidos sedimentados. El sobrenadante se mezcló con un volumen igual de etanol absoluto y se mantuvo a 4 °C durante 24 h. Los sólidos floculados se separaron mediante filtración con papel filtro y se secaron a 60 °C durante 24 h. Todas las extracciones se realizaron por triplicado. El rendimiento de extracción se calculó de acuerdo con la Ec. (1).

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{Peso de la pectina de mango seca (g)}}{\text{Peso de la cáscara de mango en polvo seca (g)}} \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

Diseño experimental

Se empleó un diseño factorial 3^2 (Tabla I), ajustado mediante un modelo de regresión cuadrática (Ec. 2). La temperatura (x_1) y el tiempo (x_2) representan las variables independientes, mientras que el Rendimiento (%) es la variable de respuesta (y). El coeficiente β_0 corresponde a la intersección del modelo; β_1 y β_2 representan los efectos lineales; β_{12} describe la interacción entre factores; y β_{11} y β_{22} corresponden a los efectos cuadráticos (Montgomery, 2017). Se llevó a cabo un análisis de regresión que permitió estimar los coeficientes correspondientes a los efectos lineales, cuadráticos y sus interacciones, empleando el software Statistica® 13.0. La calidad del ajuste del modelo obtenido se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2), mientras que la significancia estadística de los coeficientes se determinó a partir de intervalos de confianza del 95%. Los tratamientos se realizaron por triplicado.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 \quad \text{Ec. 2}$$

Grado de esterificación

La pectina obtenida de cáscara de mango, se analizó mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (ATR-FTIR). Los espectros se registraron en el intervalo de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} utilizando un espectrofotómetro FTIR (Spectrum 3, PerkinElmer, EE. UU.). Se determinaron las áreas de los picos a 1740 cm^{-1} (que representan grupos carboxílicos esterificados) y a 1630 cm^{-1} (que representan grupos de ácido carboxílico), el grado de esterificación (GE, %) se calculó mediante la siguiente Ec. (3) (Turan *et al.*, 2024):

$$GE (\%) = \frac{\text{Área del pico a } 1740 \text{ cm}^{-1}}{\text{Área del pico a } 1740 \text{ cm}^{-1} + \text{Área del pico a } 1630 \text{ cm}^{-1}} \times 100 \quad \text{Ec. 3}$$

Capacidad de Retención de Agua (CRA)

Se mezclaron 20 mg de pectina con 2 mL de agua destilada y se agitaron durante 15 min en un vortex (Hs120209, Heathrow Scientific, EE. UU.). Posteriormente, se dejó en reposo a temperatura ambiente durante 60 min y se centrifugó (CENTRIFICIENT^{III}, CRM Globe, EE. UU) a 10,000 rpm durante 20 min. El sobrenadante se retiró y el agua retenida se estimó mediante la Ec. (4) (Saelee *et al.*, 2025):

$$CRA (\text{g/g}) = \frac{\text{Peso de pectina hidratada (g)} - \text{Peso de la pectina seca (g)}}{\text{Peso de la pectina seca (g)}} \quad \text{Ec. 4}$$

Capacidad de Retención de Aceite (CRAc)

Se mezcló 1 g de pectina con 10 mL de aceite comestible y se agitó (SP88854100, Thermo Scientific Digital, EE. UU.) durante 5 h. Posteriormente, la mezcla se centrifugó a 10,000 rpm durante 15 min; el sobrenadante se dejó drenar durante 30 min y el aceite retenido se determinó a partir de la Ec. (5) (Saelee *et al.*, 2025):

$$\text{CRAc (g/g)} = \frac{\text{Peso de la pectina aceitada (g)} - \text{Peso de la pectina seca (g)}}{\text{Peso de la pectina seca (g)}} \quad \text{Ec. 5}$$

Contenido Fenólico Total (CFT)

El CFT se midió utilizando el método Folin-Ciocalteu reportado por Martínez-Ramos *et al.* (2020). Para la determinación del CFT, se mezclaron 100 µL de extracto con 2 mL de agua destilada y 200 µL de reactivo Folin–Ciocalteu (Sigma-Aldrich, F9252, EE. UU.). La mezcla se mantuvo en agitación a temperatura ambiente durante 3 minutos. Posteriormente, se añadió 1 mL de carbonato de sodio (Golden Bell, 26240, México) al 20 %, se agitó nuevamente y se dejó reposar durante una hora en condiciones de oscuridad. La absorbancia se midió a 765 nm utilizando un espectrofotómetro (GENESYS 10S, Thermo Scientific, EE. UU.). La cuantificación se realizó mediante una curva de calibración de ácido gálico (Sigma-Aldrich, G7384, EE. UU.), y los resultados se expresaron como mg de ácido gálico (GAE)/100 g masa seca (m.s).

Actividad Antioxidante (AA)

La AA se cuantificó utilizando el ensayo DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) reportado por Martínez-Ramos *et al.* (2020). Para la preparación del radical DPPH se mezclaron 4 mg de DPPH (Sigma-Aldrich, D9132, EE. UU.) con 100 mL de etanol absoluto, la solución obtenida se dejó en reposo en la oscuridad durante 30 min, después en un tubo de ensaye se mezclaron 1.5 mL del extracto o muestra con 1.5 mL del radical DPPH, la mezcla obtenida se agitó suavemente y se dejó en reposo en la oscuridad a temperatura ambiente, durante 30 min. La absorbancia fue leída a 515 nm y los resultados fueron expresados en mg de Trolox/100 g de m.s. Los análisis se realizaron por triplicado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Optimización y rendimiento de extracción

En la Tabla I se presentan los datos obtenidos del diseño experimental para el rendimiento de extracción de pectina a partir de cáscara de mango, utilizando una solución de ácido cítrico 0.1 M como medio de extracción. La Fig. 1 muestra el gráfico de superficie de respuesta obtenido, en el cual se observa el efecto de la temperatura y el tiempo sobre el rendimiento (%) de la pectina extraída. Los datos experimentales se ajustaron a un modelo de regresión cuadrática y se analizaron mediante ANOVA; el modelo resultante se presenta en la Ec. 6. Los términos lineales (x_1 y x_2), la interacción entre ellos (x_1x_2) y el término cuadrático (x_1^2) fueron estadísticamente significativos ($p < 0.05$). El signo positivo de los coeficientes lineales indica que el incremento de la temperatura y el tiempo favorece el rendimiento de extracción. No obstante, se observó un efecto antagónico de la interacción x_1x_2 , lo que sugiere que, aunque ambos factores influyen positivamente de manera individual, su combinación a valores elevados de temperatura y tiempo deja de ser favorable para la extracción de pectina. El modelo presentó un ajuste adecuado a los datos experimentales ($R^2 = 0.81$), indicando que el 81 % de la variabilidad observada en el rendimiento de extracción fue explicada por las variables evaluadas (temperatura y tiempo de extracción) y sus interacciones. Aunque este coeficiente de determinación no explica la totalidad de la variabilidad del sistema, puede considerarse aceptable para procesos de extracción de biomoléculas a partir de materias primas naturales, donde la

respuesta experimental está influenciada por la heterogeneidad propia del material vegetal y por las condiciones del proceso de extracción. La variabilidad no explicada por el modelo puede atribuirse a variables no consideradas en el diseño experimental, como el tamaño de partícula (Durán et al., 2015), la relación sólido-líquido (Saravanan & Jeevitha, 2024), las diferencias en el grado de madurez (Sayed et al., 2022) y composición química de las cáscaras de mango, así como variaciones propias del proceso experimental (Vellaisamy Singaram & Ganesan, 2022; Durán et al., 2015).

El mayor rendimiento se obtuvo a 75 °C y 90 min ($26.34 \pm 1.25\%$), mientras que el menor rendimiento se registró a 60 °C y 30 min ($11.45 \pm 2.44\%$). Según el modelo de regresión cuadrática (Ec. 6), las variables óptimas para lograr el máximo rendimiento en la extracción (26.86%) se determinaron a 75°C y 90 min.

$$y = 24.025 + 2.146x_1 + 3.290x_2 - 2.078x_1x_2 - 6.060x_1^2 - 0.450x_2^2 \quad \text{Ec. 6}$$

A pesar de esta variabilidad, el modelo presentó una adecuada capacidad predictiva, ya que las condiciones óptimas estimadas (75 °C y 90 min) coincidieron con el tratamiento que experimentalmente produjo el mayor rendimiento de extracción ($26.34 \pm 1.25\%$), mientras que el rendimiento predicho por el modelo fue de 26.86 %. La diferencia de únicamente 0.52% entre ambos valores respalda la robustez del modelo y confirma que las condiciones óptimas propuestas son confiables para maximizar el rendimiento de extracción de pectina bajo las condiciones evaluadas.

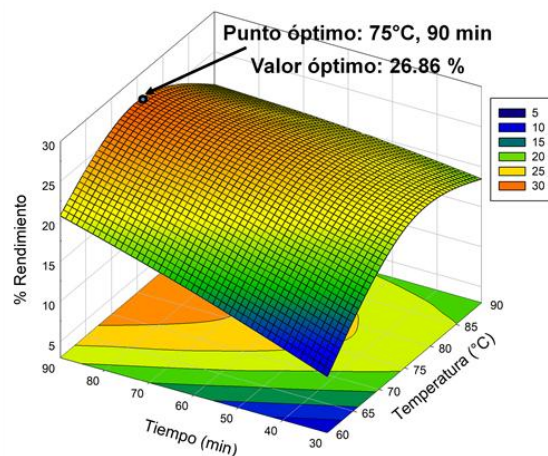


Figura 1. Gráfico de superficie de respuesta del modelo de regresión cuadrática que muestran el efecto del tiempo y temperatura de extracción sobre el porcentaje de rendimiento de extracción de pectina obtenida a partir de cáscaras de mango.

Al incrementar la temperatura de 60 a 75 °C, el rendimiento de extracción aumentó alrededor de 2.3 veces, lo cual puede explicarse por el efecto del calentamiento, el cual favorece la ruptura de la pared celular, liberando compuestos que antes no estaban disponibles y, en consecuencia, mejorando la transferencia de masa (Öztürk *et al.*, 2024). Sin embargo, al aumentar las condiciones de extracción a 90 °C y 90 min, se observó una disminución en el rendimiento, atribuido a la degradación térmica de la pectina debido al prolongado tiempo de extracción.

Resultados similares fueron reportados por Karim *et al.* (2022) quienes obtuvieron el rendimiento máximo de extracción de pectina de 30.60% y 31.70%, a partir de cáscaras de limón y mango a 80 °C durante 5 h con una solución de ácido cítrico, lo que evidencia que el empleo de un ácido orgánico favorece la extracción sin provocar una degradación importante de la pectina. En contraste, Li et al. (2025) extrajeron pectina de cáscara de mango de la variedad *Nam Dok Mai* utilizando HCl (pH = 2) a 90 °C durante 2 h, obteniendo un rendimiento cercano al 12

%. Los autores atribuyeron este comportamiento a que un pH altamente ácido, combinado con temperaturas elevadas, favorece la hidrólisis de la pectina, reduciendo su rendimiento de extracción.

Por otra parte, Pacheco-Jiménez et al. (2024) reportaron rendimientos entre 17.34 y 22.85 % en cuatro cultivares mexicanos de mango (Ataulfo, Panameño, Manila y Haden) utilizando una solución de ácido cítrico (pH=1) a 80 °C durante 60 min. Para la variedad manila, los autores obtuvieron un rendimiento del $18.43 \pm 0.27\%$, inferior al obtenido en el presente estudio ($26.34 \pm 1.25\%$), aun cuando en ambos trabajos se empleó la misma variedad de mango. Esta diferencia puede atribuirse a las distintas condiciones de extracción utilizadas, particularmente a la concentración del ácido, el pH del medio, el tiempo de extracción.

En conjunto, estos antecedentes indican que las diferencias observadas entre el presente estudio y los reportados en la literatura no dependen únicamente de la temperatura y el tiempo de extracción, sino también del tipo y concentración del ácido, del pH del medio de extracción, de las características fisicoquímicas de la materia prima y de la metodología de extracción empleada. En este contexto, el empleo de ácido cítrico 0.1 M permitió alcanzar un rendimiento de 26.34 % a 75 °C y 90 min, condiciones que representan un equilibrio entre la liberación eficiente de la pectina y la conservación de su integridad estructural, minimizando su degradación durante el proceso de extracción.

Tabla I. Diseño experimental y rendimiento de extracción, grado de esterificación (GE), capacidad de retención de agua (CRA) y aceite (CRAc) de la pectina obtenida a partir de cáscaras de mango.

#	Factores		Rendimiento	GE	CRA	CRAc
Tratamientos	x_1 (T, °C)	x_2 (t, min)	(%)	(%)	(g agua/g pectina seca)	(g aceite/g pectina seca)
1	-1 (60)	-1 (30)	11.45 ± 2.44^c	93.79 ± 1.40^{ab}	1.43 ± 0.12^{bcd}	2.23 ± 0.09^{ab}
2	-1 (60)	0 (60)	12.44 ± 0.22^c	94.35 ± 1.33^{ab}	2.04 ± 0.16^a	1.96 ± 0.00^b
3	-1 (60)	1 (90)	22.65 ± 0.11^a	89.06 ± 0.65^d	1.81 ± 0.29^{ab}	2.40 ± 0.03^a
4	0 (75)	-1 (30)	20.69 ± 1.23^{ab}	89.90 ± 0.35^{cd}	1.25 ± 0.09^{cd}	2.27 ± 0.16^{ab}
5	0 (75)	0 (60)	24.14 ± 1.92^a	91.37 ± 0.17^{bcd}	1.92 ± 0.04^{ab}	2.04 ± 0.08^{ab}
6	0 (75)	1 (90)	26.34 ± 1.25^a	92.37 ± 0.60^{abc}	1.12 ± 0.04^d	2.07 ± 0.16^{ab}
7	1 (90)	-1 (30)	16.58 ± 1.17^{bc}	91.85 ± 0.49^{bcd}	1.59 ± 0.11^{abc}	2.17 ± 0.24^{ab}
8	1 (90)	0 (60)	23.37 ± 0.24^a	93.11 ± 0.19^{ab}	1.42 ± 0.04^{bcd}	2.07 ± 0.05^{ab}
9	1 (90)	1 (90)	19.47 ± 1.20^{ab}	94.92 ± 0.10^a	1.60 ± 0.12^{abc}	2.12 ± 0.09^{ab}

Valores expresados como media $\pm$ desviación estándar (n=3). Letras diferentes indican diferencias significativas, entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Análisis FTIR

El análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es una técnica ampliamente utilizada para examinar los espectros de absorción de materiales en el infrarrojo. Los espectros FTIR de las pectinas obtenidas bajo diferentes condiciones de temperatura y tiempo de extracción (Fig. 2) mostraron las bandas características de este polisacárido, sin evidenciar cambios en la estructura química básica. En todos los tratamientos se observó una banda ancha alrededor de los 3351 cm^{-1} correspondiente a la vibración de estiramiento del enlace de hidrógeno de los grupos hidroxilo (-OH) relacionados con el ácido galacturónico, un pico de absorción a 2914 cm^{-1} debido a la vibración de estiramiento del enlace C-H de los grupos metilo y metileno (-CH, -CH₂ y -CH₃). Se observaron bandas en $\sim 1714\text{--}1719\text{ cm}^{-1}$ y $\sim 1609\text{--}1610\text{ cm}^{-1}$, asociadas al grupo carboxilo metil-esterificado (O-CH₃) y al grupo carboxilo libre (COO-), respectivamente (El Fihry *et al.*, 2024). Estas bandas son ampliamente utilizadas para evaluar el grado de esterificación (GE) de la pectina, ya que la relación entre sus áreas refleja la proporción de

grupos carboxilo esterificados y no esterificados. En los espectros se observaron ligeras variaciones en la intensidad relativa de estas bandas conforme aumentaron la temperatura y el tiempo de extracción; sin embargo, no se detectaron desplazamientos significativos en su posición, lo que indica que la estructura química principal de la pectina se conserva. De acuerdo con la ecuación utilizada para el cálculo del GE (Ec. 3), basada en la integración de las áreas de las bandas ubicadas alrededor de 1740 cm^{-1} y 1630 cm^{-1} , los resultados mostraron una tendencia al incremento del grado de esterificación con el aumento de la temperatura de extracción, lo que sugiere una mayor proporción relativa de grupos metil-esterificados en las pectinas obtenidas bajo estas condiciones. Asimismo, cuando la absorbancia de la banda cercana a 1750 cm^{-1} es superior a la correspondiente a 1650 cm^{-1} , se asocia con un mayor contenido de grupos metoxilo en la pectina analizada (Srikamwang et al., 2024). Finalmente, los picos entre 1207 cm^{-1} y 1011 cm^{-1} se atribuyen al enlace glucosídico C-O-C y a la vibración del enlace simple C-O, característicos de la cadena principal de la pectina (Turan et al., 2024).

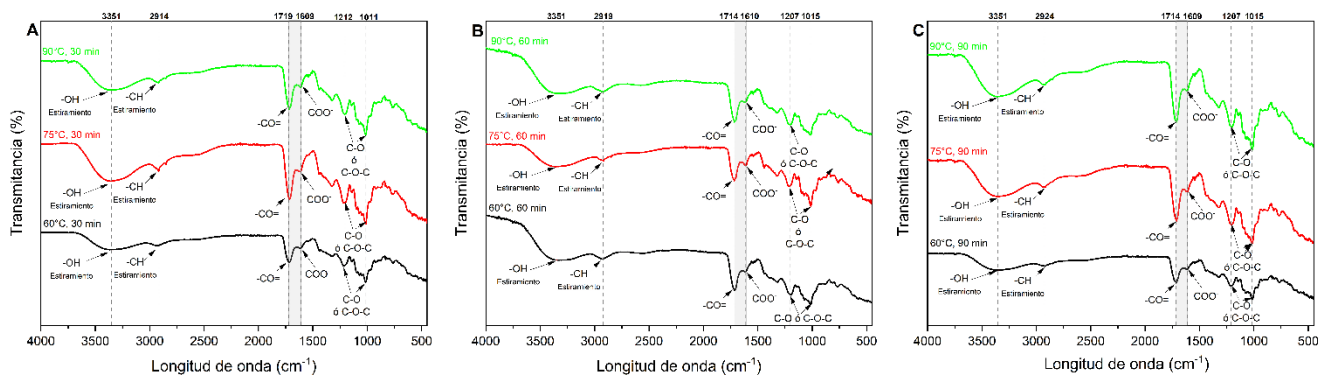


Figura 2 Espectros FTIR de pectina extraída de cáscaras de mango a diferentes temperaturas y tiempos de extracción: (A) 30 min, (B) 60 min y (C) 90 min.

En la Tabla I se muestra el grado de esterificación (GE) de la pectina obtenida bajo las diferentes condiciones de extracción evaluadas. El mayor valor de GE se registró en el tratamiento 9 ($90\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 90 min), con un valor de $94.92 \pm 0.10\%$, mientras que el menor correspondió al tratamiento 3 ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 90 min), con $89.06 \pm 0.65\%$, observándose diferencias significativas entre ambos tratamientos ($p < 0.05$). En términos generales, el grado de esterificación tendió a incrementarse con el aumento de la temperatura de extracción, lo que sugiere que temperaturas más elevadas favorecen la obtención de pectinas con un mayor contenido de grupos metoxilo. No obstante, el tratamiento 6 ($75\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 90 min), el cual correspondió a las condiciones en las que se obtuvo el mayor rendimiento de extracción de pectina, presentó un GE de $92.37 \pm 0.60\%$, sin diferencias significativas ($p > 0.05$) con respecto al tratamiento 9 ($90\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 90 min). Este resultado indica que incrementar la temperatura de extracción de 75 a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ no produce un aumento significativo del GE. Por lo tanto, las condiciones de $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 90 min representan una alternativa más conveniente, ya que permiten obtener simultáneamente el mayor rendimiento de extracción y un grado de esterificación elevado, comparable al alcanzado a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tratamiento 9).

En conjunto, los resultados del análisis FTIR y la determinación del GE indican que la temperatura y el tiempo de extracción influyen en el grado de esterificación de la pectina sin modificar su estructura química principal. Aunque los espectros FTIR evidenciaron ligeras variaciones en la intensidad relativa de las bandas asociadas a los grupos carboxílicos, la ausencia de desplazamientos significativos y los altos valores de GE ($>89\%$) confirmaron que las pectinas obtenidas conservaron un alto grado de esterificación bajo todas las condiciones evaluadas. Asimismo, la determinación del GE mediante la relación entre las áreas de las bandas correspondientes a los grupos carboxilo esterificados y no esterificados constituye un criterio más robusto para evaluar el estado de esterificación de la pectina que la interpretación visual de las variaciones en la intensidad de los espectros FTIR, como ha sido reportado por Chen et al. (2021).

Propiedades fisicoquímicas

En la Tabla I, se presentan los resultados de la CRA y CRAC, obtenidos de la pectina extraída para las diferentes condiciones de extracción. La mayor CRA se registró en el tratamiento 2 (60 °C, 60 min), con un valor de 2.04 ± 0.16 g agua/g de pectina seca, mientras que la menor correspondió al tratamiento 6 (75 °C, 90 min), con 1.12 ± 0.04 g agua/g de pectina seca, observándose diferencias significativas entre ambos tratamientos ($p < 0.05$). Cabe mencionar que, aunque el tratamiento 9 presentó el mayor GE (94.92 ± 0.10 %), no mostró la mayor CRA, mientras que el tratamiento 6, correspondiente al mayor rendimiento de extracción, presentó la menor CRA. En cuanto a la CRAC, el valor más alto se obtuvo en el tratamiento 3 (60 °C, 90 min), con 2.40 ± 0.03 g aceite/g de pectina seca, mientras que el menor fue de 1.96 ± 0.00 g aceite/g de pectina, registrándose igualmente diferencias significativas ($p < 0.05$). Para el tratamiento 6, el cual fue el que presentó un mayor rendimiento de extracción, el valor de CRAC no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) respecto al tratamiento 3. Estos resultados indican que la CRA y CRAC no dependen exclusivamente del grado de esterificación, sino también de otros parámetros estructurales, como el peso molecular, el grado de ramificación y la longitud de las cadenas de ácido galacturónico, los cuales pueden modificarse durante el proceso de extracción (Gawkowska et al., 2018; Chen et al., 2021). En este sentido, la determinación del GE mediante FTIR proporciona información sobre la proporción de grupos carboxilo esterificados, pero no refleja por sí sola las modificaciones estructurales responsables de las propiedades funcionales de la pectina.

Finalmente, los resultados del GE, propiedades funcionales (CRA, CRAC) y antioxidantes (CFT, AA) de la pectina obtenida para el punto óptimo obtenido del modelo de regresión cuadrática (Ec. 2) se presentan en la Tabla II. El GE obtenido fue de 92.37 ± 0.60 %, lo que clasifica a la pectina como de alto metoxilo, característica que favorece su capacidad gelificante en sistemas con alto contenido de azúcar y condiciones ácidas, por lo cual podría emplearse como agente espesante, gelificante y estabilizante. En cuanto a sus propiedades funcionales, la CRA de la pectina se refiere a su habilidad para absorber y retener agua, siendo una propiedad esencial que influye en las características texturales, fisiológicas y tecnológicas de diversos productos alimenticios. En este estudio, la CRA fue de 1.12 ± 0.04 g agua/g pectina, lo que indica una adecuada afinidad por el agua, atribuida a la presencia de grupos hidroxilo. Este resultado sugiere su potencial aplicación como agente espesante en el sector alimentario. Por otro lado, la CRAC se define como la habilidad de la pectina para absorber y retener aceite dentro de su estructura, obteniéndose un valor de 2.07 ± 0.16 g aceite/g pectina. Este resultado es comparable con lo reportado por Rubio-Senent et al., (2015) para pectina de manzana comercial (2.00 g agua/g pectina y 2.22 g aceite/g pectina seca). Romdhane *et al.*, (2017) reportaron que la pectina extraída de cáscara de sandía presentó una CRA de 2 g agua/g pectina y una CRAC de 4 g aceite/g pectina. Asimismo, Saravanan & Jeevitha (2024), cuantificaron un CRA de pectina de cáscaras de mango de 3.20 g agua/g pectina y una CRAC de 15.20 g aceite/g pectina, lo que indica una mayor afinidad por compuestos lipídicos. En conjunto, estos resultados sugieren que la pectina obtenida a partir de cáscara de mango presenta una aceptable capacidad de retención de agua y una capacidad moderada de retención de aceite.

Tabla II. Grado de esterificación, propiedades funcionales y antioxidantes de la pectina obtenida de cáscaras de mango en las condiciones óptimas de extracción (75°C y 90 min).

GE (%)	CRA (g agua/ g de pectina seca)	CRAC (g aceite/ g de pectina seca)	CFT mg GAE/100 g muestra seca	AA mg TROLOX/100 g muestra seca
92.37 ± 0.60	1.12 ± 0.04	2.07 ± 0.16	2513.82 ± 72.79	18.49 ± 0.48

Valores expresados como media $\pm$ desviación estándar (n=3).

El CFT y AA (Tabla II) obtenidos de la pectina extraída de la cáscara de mango, fueron superiores en comparación con los reportados por Turan *et al.*, (2024) quienes determinaron el CFT de pectina extraída de cáscaras de naranja en un rango de 740-819 mg GAE/100 g, mientras Saravanan & Jeevitha, (2024) obtuvieron un valor de CFT de 288 mg GAE/100 g m.s, en pectina obtenida de cáscaras de mango. En cuanto a la AA, se obtuvo alrededor de la mitad

de la concentración en comparación con el estudio de Iñiguez-Moreno et al. (2024) quienes reportaron un valor de 39.3 ± 10.2 mg Trolox/100 g de pectina de cáscara de naranja bajo las condiciones de extracción que generaron el. Estas diferencias pueden atribuirse tanto al origen de la materia prima como a las condiciones de extracción, las cuales influyen en la recuperación de compuestos fenólicos asociados a la matriz de la pectina. Además, se ha señalado que la actividad antioxidante de la pectina está relacionada con la presencia de grupos polihidroxilo en su estructura, los cuales contribuyen a la neutralización de radicales libres (Mahmoud & Azab, 2025). En conjunto, los resultados evidencian que la pectina obtenida no solo presenta un alto grado de esterificación, sino también propiedades funcionales y bioactivas relevantes, lo que amplía su potencial de aplicación en la industria alimentaria como agente gelificante con valor agregado.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron cumplir el objetivo planteado, al identificar las condiciones óptimas de extracción de pectina a partir de cáscaras de mango mediante el uso de una solución de ácido cítrico como medio de extracción. El modelo de regresión obtenido demostró que la temperatura y el tiempo de extracción influyen tanto en el rendimiento como en las propiedades de la pectina, alcanzando el máximo rendimiento (26.34%) bajo condiciones intermedias de temperatura (75°C y 90 min). Adicionalmente, se comprobó que la pectina obtenida presenta características fisicoquímicas y estructurales adecuadas para su aplicación industrial, destacando su alto grado de esterificación, la conservación de su estructura química y la presencia de propiedades funcionales y bioactivas relevantes. Los resultados obtenidos evidencian el potencial de las cáscaras de mango como materia prima viable para la obtención de pectina, contribuyendo al aprovechamiento integral de residuos agroindustriales y al desarrollo de procesos más sostenibles dentro del sector alimentario.

BIBLIOGRAFÍA

- Chen, J., Cheng, H., Zhi, Z., Zhang, H., Linhardt, R. J., Zhang, F., Chen, S., & Ye, X. (2021). Extraction temperature is a decisive factor for the properties of pectin. *Food Hydrocolloids*, 112, 106160. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106160>
- 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>
- Durán, R., Villa, A. L., Ribeiro, R., & Rabi, J. A. (2015). Pectin extraction from mango peels in batch reactor: Dynamic one-dimensional modeling and lattice Boltzmann simulation. *Chemical Product and Process Modeling*, 10(3), 203–210. <https://doi.org/10.1515/cppm-2015-0014>
- El Fihry, N., El Mabrouk, K., Eeckhout, M., Schols, H. A., & Hajjaj, H. (2024). Physicochemical, structural, and functional characterization of pectin extracted from quince and pomegranate peel: A comparative study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 256, 127957. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127957>
- Gawkowska, D., Cybulska, J., & Zdunek, A. (2018). Structure-related gelling of pectins and linking with other natural compounds: A review. *Polymers*, 10(7), 762.
- Gemechu, B., Keyata, E. O., Geleta, T. E., Gemele, H. F., & Bayata, A. (2024). Optimization of mango peel pectin extraction (*Mangifera indica* L.): For the production of jam and jelly. *Applied Food Research*, 4(1), 100411. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100411>
- Iñiguez-Moreno, M., Pizaña-Aranda, J. J. P., Ramírez-Gamboa, D., Ramírez-Herrera, C. A., Araújo, R. G., Flores-Contreras, E. A., Iqbal, H. M. N., Parra-Saldivar, R., & Melchor-Martínez, 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(Pt 1), 130230. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130230>
- Karim, R., Nahar, K., Zohora, F. T., Islam, M. M., Bhuiyan, R. H., Jahan, M. S., & Shaikh, M. A. A. (2022). Pectin from lemon and mango peel: Extraction, characterisation and application in biodegradable

- film. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 4, 100258. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100258>
- Li, Y., Shuai, X., Zhang, M., Deng, X., Zhang, Y., Li, L., & Du, L. (2025). The physicochemical properties, structural characteristics, and rheological behavior of mango peel pectin with different degree of esterification. *Journal of Future Foods*, 7(1), 260–271. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.12.013>
- Mahmoud, M. H., & Azab, D. E.-S. H. (2025). Upcycling mango and pomegranate peel as pectin source: characterization, fat substitute and retarded lipid oxidation in caramel candy. *Discover Food*, 5(1), 37. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00295-9>
- Martínez-Hernández, A., Caamal-Cauch, I., Pat-Fernández, V. G., & Reza-Salgado, J. (2025). Indicadores de competitividad de las exportaciones de mango mexicano en el mercado mundial. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 16(2), e3415. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i2.3415>
- Martínez-Ramos, T., Benedito-Fort, J., Watson, N. J., Ruiz-López, I. I., Che-Galicia, G., & Corona-Jiménez, E. (2020). Effect of solvent composition and its interaction with ultrasonic energy on the ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from Mango peels (*Mangifera indica* L.). *Food and Bioprocess Technology*, 122, 41–54. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.03.011>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons.
- Muslu Can, A., Metin Yildirim, R., & Karadag, A. (2024). The Properties of Pectin Extracted from the Residues of Vinegar-Fermented Apple and Apple Pomace. *Fermentation*, 10(11), 556. <https://doi.org/10.3390/fermentation10110556>
- Öztürk, T., Özbek, H. N., & Koçak Yanık, D. (2024). Environmentally friendly approach to pectin extraction from grapefruit peel: Microwave-assisted high-pressure CO₂/H₂O. *Foods*, 13(3), 476. <https://doi.org/10.3390/foods13030476>
- Pacheco-Jiménez, A. A., Basilio Heredia, J., Gutiérrez-Grijalva, E. P., Quintana-Obregón, E. A., & Muy-Rangel, M. D. (2022). Potencial industrial de la cáscara de mango (*Mangifera indica* L.) para la obtención de pectina en México. *Tip revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 25. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.419>
- Pacheco-Jiménez, A. A., Lizardi-Mendoza, J., Heredia, J. B., Gutiérrez-Grijalva, E. P., Quintana-Obregón, E. A., & Muy-Rangel, M. D. (2024). Physicochemical characterization of pectin and mango peel (*Mangifera indica* L.) from Mexican cultivars. *Heliyon*, 10(15), e35184. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35184>
- Romdhane, M. B., Haddar, A., Ghazala, I., Jeddou, K. B., Helbert, C. B., & Ellouz-Chaabouni, S. (2017). Optimization of polysaccharides extraction from watermelon rinds: Structure, functional and biological activities. *Food Chemistry*, 216, 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.056>
- Rubio-Senent, F., Rodríguez-Gutiérrez, G., Lama-Muñoz, A., & Fernández-Bolaños, J. (2015). Pectin extracted from thermally treated olive oil by-products: Characterization, physico-chemical properties, in vitro bile acid and glucose binding. *Food Hydrocolloids*, 43, 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.06.001>
- Saelee, M., Myo, H., & Khat-Udomkiri, N. (2025). Sustainable pectin extraction from Riang husk using ultrasound-assisted extraction with deep eutectic solvents and its potential in antipollution products. *Ultrasonics Sonochemistry*, 114, 107256. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107256>
- Saravanan, R., & Jeevitha, G. C. (2024). Sustainable approach for utilization of mango peel wastes for pectin extraction by natural deep eutectic solvents. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2024(1), 4540390. <https://doi.org/10.1155/2024/4540390>
- Sayed, M. A., Kumar, J., Rahman, M. R., Noor, F., & Alam, M. A. (2022). Effect of extraction parameters on the yield and quality of pectin from mango (*Mangifera indica* L.) peels. *Discover Food*, 2(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s44187-022-00029-1>
- Şen, E., Göktürk, E., & Uğuzdoğan, E. (2024). Microwave-assisted extraction of pectin from onion and garlic waste under organic, inorganic and dual acid mixtures. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(5), 3189–3198. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02395-z>
- Shubhangi, S., Khalid Mehmood, W., Shaik Mahammad, M., Laksmi S, J., & Sneha Soundara, R. (2026). 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>

- Srikamwang, C., Willats, W. G. T., Bakshani, C. R., Sommano, S. R., & Wongkaew, M. (2024). Potentials of Mahachanok mango peel pectin in modulating glycaemic index in simulated in vitro carbohydrate digestion of meat product. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101304. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101304>
- Stubley, S. J., Cayre, O. J., Murray, B. S., & Torres, I. C. (2023). Emulsifying properties of sugar beet pectin microgels. *Food Hydrocolloids*, 137, 108291. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108291>
- Turan, O., Isci, A., Yilmaz, M. S., Tolun, A., & Sakiyan, O. (2024). Microwave-assisted extraction of pectin from orange peel using deep eutectic solvents. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37, 101352. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101352>
- Vellaisamy Singaram, A. J., & Ganesan, N. D. (2022). Modeling the influence of extraction parameters on the yield and chemical characteristics of microwave extracted mango (*Mangifera indica* L.) peel pectin by response surface methodology. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 52(6), 711–723. <https://doi.org/10.1080/10826068.2021.1989697>