

Extracción de fibra dietaria de cáscara de naranja mediante microondas y método convencional: Propiedades macromoleculares y funcionales

Extraction of Dietary Fiber from Orange Peel Using Microwave and Conventional Method: Macromolecular and Functional Properties

Ricardo Montañez-Domínguez¹, Luz Araceli Ochoa-Martínez^{1*}, Juliana Morales-Castro¹, Silvia Marina González-Herrera¹

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Durango, Blvd. Felipe Pescador 1830 Ote., Durango, Dgo. C.P. 34080, México

*Correspondencia: aochoa@itdurango.edu.mx (Luz Araceli Ochoa-Martínez)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v18i4.1686>

Recibido: 02 de octubre de 2024; Aceptado: 16 de enero de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Miguel Ángel Sánchez-Madrigal

Resumen

La fibra dietaria (FD) es un conjunto de polímeros de carbohidratos esenciales para la salud humana presentes en alimentos de origen vegetal. Su consumo mejora el tránsito intestinal y puede contribuir a reducir los niveles de glucosa y colesterol en la sangre. El objetivo de este estudio fue comparar las propiedades macromoleculares y funcionales de la fibra dietaria soluble (FDS) e insoluble (FDI) extraída de la cáscara de naranja por dos métodos: el método ácido convencional y el método asistido por microondas, y compararla con fibra comercial. Los resultados mostraron que la extracción asistida por microondas mejoró significativamente el rendimiento de la FDS, logrando 24.33 ± 0.75 g/100 g, en comparación con 14.83 ± 0.73 g/100 g obtenido mediante el método ácido convencional. En cuanto a la FDI, no se encontraron diferencias significativas. Con ambos métodos de extracción, la FD presentó características macromoleculares propias. Con el uso de microondas la fibra presentó mejores propiedades funcionales, como la capacidad de hinchamiento, retención de agua, retención de aceite, y adsorción de colesterol y glucosa. En conclusión, el uso de microondas es un método más eficiente para obtener fibra dietaria de calidad, surgiendo como una alternativa para el aprovechamiento de la cáscara de naranja.

Palabras clave: fibra dietaria, microondas, propiedad funcional, extracción, cáscara de naranja

Abstract

Dietary fiber (DF) is a group of carbohydrate polymers essential for human health, found in plant-based foods. Its consumption improves intestinal transit and may help reduce blood glucose and cholesterol levels. The aim of this study was to compare the macromolecular and functional properties of soluble (SDF) and insoluble (IDF) fiber extracted from orange peel by two methods: the conventional acid and the microwave-assisted method, and to compare them with commercial fiber. The results showed that microwave-assisted extraction significantly improved SDF yield, achieving 24.33 ± 0.75 g/100 g compared to 14.83 ± 0.73 g/100 g obtained by the conventional acid method. For IDF, no significant differences were found. Both extraction methods produced fibers with their inherent macromolecular properties. The microwave-extracted fibers presented better functional properties such as swelling capacity, water retention, oil retention, and cholesterol and glucose adsorption. In conclusion, microwaves are more efficient for obtaining high-quality dietary fiber, offering an alternative to take advantage of the orange peel.

Keywords: dietary fiber, microwave, functional property, extraction, orange peel

1. Introducción

La fibra dietaria (FD) es un componente esencial de la alimentación humana, ampliamente reconocido por sus beneficios para la salud. Se define como polímeros de carbohidratos con al menos diez unidades monoméricas que no son hidrolizados por las enzimas del intestino delgado humano (Stribling, 2023). La FD se clasifica en fibra dietaria soluble (FDS) e insoluble (FDI), cada una con propiedades específicas que contribuyen a la salud intestinal y metabólica. Estas fibras no solo son fundamentales para la nutrición, sino también para la industria alimentaria, donde se valoran por su capacidad para mejorar la textura, estabilidad y funcionalidad de los productos procesados.

La FDS, presente en alimentos como avena, legumbres, frutas y verduras, tiene la capacidad de formar geles y aumentar la viscosidad del contenido intestinal. Esto ralentiza el vaciado gástrico y la absorción de glucosa, lo que ayuda a controlar los niveles de azúcar en sangre y colesterol. Además, actúa como un prebiótico al ser fermentada por bacterias intestinales, generando ácidos grasos de cadena corta que promueven la salud intestinal y reducen el riesgo de enfermedades cardiovasculares (Guan *et al.*, 2021; Soliman, 2019; Wu *et al.*, 2023; Bai *et al.*, 2022). Por otro lado, la FDI, abundante en cereales integrales, salvado de trigo y frutas con piel comestible, no se disuelve ni es fermentada de manera significativa. Su principal función es aumentar el volumen fecal, facilitar la motilidad intestinal y prevenir el estreñimiento (Emran *et al.*, 2022; Reynolds *et al.*, 2020).

Hoy en día, estas propiedades promotoras de la salud de la FD han abierto una gran demanda potencial de productos ricos en FD y han marcado una tendencia en la búsqueda de nuevas fuentes que podrían encontrar aplicación en la industria alimentaria. Entre estas fuentes destacan los cítricos, conocidos por su alto contenido de compuestos bioactivos y fibra dietaria, siendo las naranjas las líderes, con aproximadamente un 65 % de la producción mundial (Martínez-Jiménez *et al.*, 2020). En este contexto, la cáscara de naranja resalta como una fuente especialmente rica en fibra dietaria, conteniendo entre un 36 % y un 80 % de FD en base a peso seco (Tejada-Ortigoza *et al.*, 2016; Kute *et al.*, 2020). Este valor puede ser significativamente superior al de otros subproductos, como la cáscara de mango, que presenta porcentajes de fibra dietaria total entre el 30 % y el 35 %; la cáscara de limón,

con valores entre el 45 % y el 61 %; o la cáscara de toronja, que alcanza un 62 % (De Lourdes *et al.*, 2013; Gan *et al.*, 2020; Núñez-Gómez *et al.*, 2024), consolidando a la cáscara de naranja como un subproducto ideal para el desarrollo de productos funcionales y sostenibles en la industria alimentaria.

La mayoría de los cítricos se destinan a jugos frescos o bebidas envasadas. Derivado del proceso industrial de la naranja, la cáscara representa alrededor de la mitad de la masa de la naranja, siendo el principal subproducto generado. Los residuos provenientes de las industrias de procesamiento de cítricos son una buena fuente de FD (Ayala *et al.*, 2021; Benassi *et al.*, 2021). En la actualidad, uno de los métodos más utilizados para la extracción de FD es el método convencional ácido con calentamiento, que tiene la ventaja de ser de operación simple y bajo costo de preparación. Sin embargo, presenta varias desventajas, como la destrucción de la estructura química de los componentes, debido a los largos tiempos de exposición, lo que reduce la eficiencia de extracción y la calidad de la FD, afectando sus propiedades funcionales (Wolti-Chanes *et al.*, 2020).

El uso de tecnologías alternativas, como el microondas, cuyo principio se basa en ondas electromagnéticas de alta frecuencia para calentar y desestabilizar las estructuras celulares de los alimentos, podría mejorar la extracción de fibra dietaria al reducir el tiempo y la energía necesarios para el proceso, así como mejorar la pureza y la calidad del extracto (Kute *et al.*, 2020). Al respecto, Wongkaew *et al.* (2020) demostraron que la extracción asistida por microondas aplicada a la cáscara de mango no solo permitió reducir significativamente el tiempo de procesamiento e incrementar los rendimientos obtenidos, sino que también permitió obtener una fibra dietaria con mayor porosidad y mejores propiedades de rehidratación. Esto la hizo especialmente adecuada para su incorporación en productos como salchichas deshidratadas, donde dichas propiedades son cruciales para su funcionalidad y calidad final. Por ello, el objetivo de este estudio fue comparar las propiedades macromoleculares y funcionales de las fibras extraídas por dos métodos: el método ácido convencional y el método asistido por microondas, para obtener fibra dietaria soluble (FDS) e insoluble (FDI) a partir de cáscaras de naranja, permitiendo así analizar su calidad frente a las disponibles en el mercado.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

Las cáscaras de naranja resultantes del proceso de extracción de jugo de naranja se obtuvieron durante el período de octubre-noviembre del año 2023, mediante donaciones por parte de la microempresa Jugópolis, ubicada en la ciudad de Durango, Dgo., México. Los estándares de glucosa y colesterol se adquirieron de la empresa Sigma-Aldrich Chemical Co. (St. Louis, MO, EE. UU.). El resto de los productos químicos y solventes empleados fueron grado reactivo y se utilizaron sin someterse a purificación adicional. La fibra insoluble comercial utilizada fue de la marca ZANA elaborada en Chihuahua, Chih. mientras que la pectina comercial se adquirió en la empresa Deiman, S.A. de C.V. de Ciudad de México.

2.2 Preparación de la materia prima

A las cáscaras de naranja obtenidas del proceso de extracción del jugo, se les retiraron los residuos de pulpa, semillas y otras fibras adheridas (bagazo), y se lavaron con una solución de hipoclorito de sodio al 10 %. Posteriormente, se cortaron longitudinalmente en tiras de 4 a 5 mm de ancho y se secaron en una secador de charolas (APEX, México) a 50 °C durante 5 horas. Después, se realizó una molienda utilizando una licuadora clásica (Oster, BLST4127, México), y finalmente se llevó a cabo un tamizado en malla No. 40, obteniendo un tamaño de partícula de 420 nm. Para la caracterización de la materia prima se determinó el contenido de FD, proteína, humedad y cenizas, de acuerdo con los métodos AOAC 991.43, 978.04, 930.04 y 930.05, respectivamente (AOAC, 2005).

2.3 Extracción convencional

La extracción ácida convencional de fibra dietaria se realizó siguiendo el protocolo descrito por Kute *et al.* (2020). Se agregaron 10 g de polvo de cáscara de naranja a 400 mL de agua destilada, ajustando el pH a 2 mediante la adición de HCl al 5 %. La mezcla se calentó con agitación a 70 °C durante 2 horas. Después se llevó a cabo una filtración utilizando papel filtro (Whatman No. 1), separando el filtrado del residuo. El residuo fue enjuagado con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro y se secó para obtener la fibra dietaria insoluble. Por otra parte, el filtrado fue neutralizado mediante la adición de una solución de NaOH al 5 %, después se concentró a 100 mL bajo presión reducida en un rotavapor (Hahnshin, HS-2000NS, República de Corea) a 60 °C, y se añadieron 100 mL de etanol al 95 % para la precipitación de la FDS. El precipitado se refrigeró a 4 °C durante 24 h, y se separó por centrifugación (Hermile, Corning LSE, Alemania) a 4185 x g durante 15 minutos con dos lavados con etanol al 95 %. Por último, ambos componentes se secaron en una estufa (Riossa, H-48, USA) a 50 °C por 24 h, obteniendo las muestras C-FDS (fibra soluble extraída de forma convencional) y C-FDI (fibra insoluble extraída de forma convencional). Este procedimiento se realizó por triplicado. El contenido de proteína, humedad y cenizas se determinó de acuerdo con los métodos descritos en el punto 2.2.

2.4 Extracción asistida con microondas

Para este proceso se utilizó un equipo de microondas (LG, MJ1481BP/00, Corea del Sur), en donde a través de experimentos preliminares utilizando un diseño de optimización Box-Behnken, se determinaron las condiciones óptimas para la extracción de fibra a partir de cáscara de naranja. En este diseño, se evaluaron los siguientes factores y niveles: potencia del microondas (900 W, 720 W y 540 W), tiempo de extracción (8 minutos, 5:30 minutos y 3 minutos) y pH del medio (1, 2 y 3). A partir del resultado de los preliminares, se fijaron las condiciones de 900 W, tiempo de 3 min y pH de 1 el cual se ajustó con una solución de HCl al 5 %. En 400 mL de agua destilada se añadieron 10 g de polvo de cáscara de naranja y se aplicaron las condiciones seleccionadas de 900 W, 3 min y pH de 1. Una vez aplicadas estas condiciones, la mezcla se filtró a vacío, utilizando papel filtro (Whatman No. 1), separando el residuo del filtrado. A partir de aquí, tanto el residuo como el filtrado se procesaron de igual forma que para la extracción convencional (apartado 2.3), obteniendo las muestras M-FDS (fibra soluble extraída por microondas) y M-FDI (fibra insoluble extraída por microondas). Este

procedimiento se realizó por triplicado. El contenido de proteína, humedad y cenizas se determinó de acuerdo con los métodos descritos en el punto 2.2.

2.5 Propiedades macromoleculares

2.5.1 Microestructura y propiedades morfológicas (SEM)

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (Hitachi, modelo SU3500, Tokio, Japón) para observar la microestructura y morfología de la FD. Las muestras se colocaron en un soporte de muestra con cinta adhesiva de doble cara y se cubrieron con una capa de oro mediante pulverización, posteriormente se observó cada muestra con aumentos de 100X a 1000X y un voltaje de aceleración de 15.0 kV.

2.5.2 Análisis molecular (FTIR)

La obtención del espectro con el patrón de la información estructural FTIR de las muestras, se llevó a cabo utilizando un espectrómetro FTIR Vertex 70v (Perkin Elmer, EE.UU.), acoplado con un accesorio de tecnología ATR (reflexión total atenuada). Todos los resultados fueron procesados utilizando el software OPUS 7.2. Se mezcló una muestra con polvo de bromuro de potasio (KBr) en proporción de 1:100 (v/v) y se prensaron en forma de pastillas. Los espectros fueron medidos en el rango de frecuencia de 4500 a 500 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} .

2.5.3 Estructura cristalina (XRD)

La estructura de la FDI y FDS se analizó mediante un difractómetro de rayos X (XRD-6100, Shimadzu, Japón) con voltaje de trabajo de 40 kV y una corriente incidente de 40 mA. La región para el escaneo del ángulo de difracción (2θ) abarcó a partir de 5 hasta 55 grados, con velocidad de escaneo de $2^\circ/\text{min}$.

2.6 Propiedades funcionales

2.6.1 Solubilidad en agua (SA)

La SA de las muestras de FD se determinó según el método descrito por Dong *et al.* (2020). Una muestra de 0.1 g (m) de FD se mezcló con 5 mL de agua destilada. La mezcla se agitó a 90°C durante 30 minutos en baño María, posteriormente se realizó una centrifugación a $2790 \times g$ durante 15 minutos. Se recogió, secó y pesó el sobrenadante (m1). El índice de solubilidad se calculó a partir de la Ec. (1).

$$SA (\%) = 100 \times \frac{m1}{m} \quad \text{Ec. (1)}$$

2.6.2 Capacidad de hinchamiento (CH)

La CH se determinó utilizando el método de Zhang *et al.* (2011) con ligeras modificaciones. Se colocó una muestra de 0.3 g (m) de FD en un tubo de ensayo, se registró el volumen original (v1) y se añadieron 5 mL de agua. Se hidrató durante 24 horas a 25 °C, y se registró el volumen final (v2) de la fibra hinchada. Luego, se calculó la CH utilizando la Ec. (2).

$$CH \text{ (mL/g)} = \frac{v2-v1}{m} \quad \text{Ec. (2)}$$

2.6.3 Capacidad de retención de agua (CRA)

La CRA se llevó a cabo de acuerdo con el método descrito por Liu *et al.* (2022). Primero, se añadió 1 g (m1) de muestra de FD a 25 mL de agua destilada a temperatura ambiente (25 °C) y se dejó en reposo durante 1 hora. Después se centrifugó a 3348 x g durante 10 min, los residuos se extrajeron y pesaron (m2). Finalmente, la CRA se determinó mediante la Ec. (3).

$$CRA \text{ (g/g)} = \frac{m2-m1}{m1} \quad \text{Ec. (3)}$$

2.6.4 Capacidad de retención de aceite (CRAC)

Se empleó un método modificado de Liu *et al.* (2022), en el cual se agregó 1 g (m1) de muestra de FD a 25 mL de aceite de soja durante 2 h. Después se centrifugó a 3348 x g durante 10 min, los residuos se extrajeron y pesaron (m2). El CRAC se calculó utilizando la Ec. (4).

$$CRAC \text{ (g/g)} = \frac{m2-m1}{m1} \quad \text{Ec. (4)}$$

2.6.5 Capacidad de adsorción de colesterol (CAC)

La CAC de las muestras de DF se determinó mediante el método de o-ftalaldehído descrito por Qiao *et al.* (2021) con ligeras modificaciones. Se preparó una solución de yema de huevo y agua destilada (1:9, v/v). Se añadieron 0.5 g de la muestra de FD (m) a 25 mL de la solución de yema diluida, y se ajustó el pH de la mezcla a pH 2.0, seguido de una incubación a 37 °C en un baño de agua con agitación durante 2 horas. Se utilizó una solución de yema diluida sin la muestra de DF, como blanco. La mezcla se centrifugó a 2790 x g durante 10 minutos y se midió la absorbancia del sobrenadante a 550 nm. El contenido de colesterol en la yema diluida que contiene FD se registró como m2 y en la yema diluida sin FD como m1. La CAC se calculó con la Ec (5).

$$CAC \text{ (mg/g)} = \frac{m1 - m2}{m} \quad \text{Ec. (5)}$$

2.6.6 Capacidad de adsorción de glucosa (CAG)

El CAG se determinó utilizando el método de Tan *et al.* (2024) con ligeras modificaciones. Se mezclaron 0.25 g (m) de FD con 50 mL (v) de una solución de glucosa (100 mmol/L) (C_1) y se incubaron a 37 °C durante 2 horas. Luego, la mezcla se centrifugó a 2790 x g durante 20 minutos a temperatura ambiente. La concentración de glucosa en el sobrenadante (C_2) se midió mediante el método DNS. La capacidad de adsorción de glucosa (mmol/g) se calculó utilizando la Ec. (6).

$$\text{CAG (mmol/g)} = (C_1 - C_2) \times \frac{v}{m} \quad \text{Ec. (6)}$$

2.6.7 Análisis estadístico

Los datos experimentales se analizaron utilizando el software estadístico Minitab versión 19.1. Los resultados se expresaron como media \pm DE. Para determinar el efecto de las variables independientes o factores sobre las respuestas, se empleó un análisis de varianza de una vía (ANOVA), considerando como significativo $p < 0.05$. Posteriormente, las diferencias entre los grupos experimentales se evaluaron mediante el método de comparaciones múltiples de medias de Tukey.

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización de la cáscara de naranja

La composición proximal de la cáscara de naranja en base a peso seco (p/p, %) fue la siguiente: FDI 53.26 ± 3.50 %, FDS 26.45 ± 0.89 %, proteína 4.76 ± 0.08 %, humedad 7.12 ± 0.76 % y cenizas 4.49 ± 0.08 %. Estos resultados evidencian la gama de componentes valiosos que aún contiene la cáscara de naranja y que justifica su aprovechamiento para recuperarlos, para su uso como ingredientes en la industria alimentaria. En comparación, Kute *et al.* (2020) reportaron valores similares con un contenido de humedad de 8.33 ± 1.14 %, cenizas de 4.50 ± 0.18 %, proteína de 5.6 ± 0.16 % y un contenido de fibra total de 81.06 ± 0.9 %.

3.2 Efecto del método de Extracción

3.2.1 Rendimientos de extracción y composición química de FDI y FDS

En la Tabla 1 se presenta el análisis proximal y los rendimientos de extracción de fibra dietaria soluble e insoluble obtenidos tanto por el método convencional como el de microondas. Los resultados indican diferencias significativas en los rendimientos de la fibra dietaria soluble entre ambos métodos. Sin embargo, no se observan diferencias significativas en los contenidos de humedad, proteína y ceniza, tanto en las fracciones de fibra solubles como insolubles. Se observó que el contenido de FDS en la extracción convencional fue significativamente menor en comparación con la extracción asistida por microondas, lo que sugiere una mayor liberación de FDS con el uso de microondas. Es probable que los tratamientos con microondas rompieran de manera más eficiente la

pared celular, facilitando la conversión de FDI a FDS. Junto a ello, también largos tiempos en la solución ácida en el método convencional, posiblemente ocurrió una destrucción de polisacáridos, debido a la acción que tiene el ácido en los grupos glucosídicos, hidrolizando la FDS en oligosacáridos y monosacáridos (Kratchanova *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2022). Por otra parte, al comparar el contenido de FDI obtenido mediante el método convencional con el extraído por microondas, no se encontraron diferencias significativas. Los resultados obtenidos en este estudio fueron ligeramente superiores al rango reportado por Huang *et al.* (2021), que oscilaba entre 40.95 y 53.79 % de FDI a partir de diversos tratamientos para la extracción de fibra dietaria de cáscara de naranja. Esto sugiere una buena liberación de FDS sin degradación de la FDI en el estudio.

Tabla 1. Rendimiento de extracción y composición de las muestras de fibra dietaria (g/100 g en base seca).

Table 1. Extraction yield and composition of dietary fiber samples (g/ 100 g dry basis).

	FDS		FDI	
	Microondas	Convencional	Microondas	Convencional
Rendimiento	24.33 ± 0.75 ^a	14.83 ± 0.73 ^b	54.25 ± 0.57 ^a	55.10 ± 0.67 ^a
Humedad	7.6 ± 0.28 ^a	7.75 ± 0.35 ^a	6.1 ± 0.14 ^a	6.05 ± 0.21 ^a
Proteína	5.35 ± 0.34 ^a	5.54 ± 0.41 ^a	4.86 ± 0.58 ^a	5.44 ± 0.54 ^a
Ceniza	3.24 ± 0.29 ^a	3.40 ± 0.63 ^a	4.79 ± 0.44 ^a	5.01 ± 0.16 ^a

Los datos son medias ± DE de mediciones por triplicado. Letra superíndice diferente indica diferencia significativa ($p < 0.05$) en comparaciones por filas, determinadas mediante la prueba de Tukey.

3.3 Propiedades macromoleculares

3.3.1 Microestructura y propiedades morfológicas (SEM)

La microestructura de la FDS y FDI de la cáscara de naranja se observa en la Fig. 1. La superficie de la M-FDS mostró una textura rugosa con pocos vacíos y fragmentos irregulares, en comparación con la C-FDS, que exhibió una estructura relativamente plana y suelta con ciertos espacios entre las fibras. Por otro lado, tanto la M-FDS como la C-FDS presentó una estructura de red celular irregular con numerosas grietas y pequeños grupos, lo cual podría estar relacionado con la destrucción de celulosa y hemicelulosa provocada por los métodos de extracción y las condiciones de procesamiento

En cuanto a la microestructura de la fracción de FDI, las imágenes de SEM de C-FDI y M-FDI revelaron una masa irregular a 100X de aumento. A 1000X de aumento, se observó una estructura rugosa e irregular, siendo más pronunciada en la C-FDI. Esto puede deberse a la potente actividad oxidativa y la fuerza destructiva del HCl, que causó daños significativos durante el prolongado proceso de extracción, resultando en una estructura más deteriorada en comparación con la M-FDI. Los resultados sugieren que los diferentes métodos de procesamiento pueden afectar las microestructuras de las muestras de FDI.

La microestructura de la fibra dietaria está estrechamente relacionada con sus propiedades funcionales. Se ha observado que una estructura más porosa y rugosa mejora la CH, CRA y CRAC, así como su CAG Y CAC (Yan *et al.*, 2019; Gan *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2021). En este sentido, se observa que la mayor rugosidad y porosidad de la M-FDS, en comparación con la C-FDS, podría traducirse en una mejor retención de agua y aceite, así como una mayor adsorción de colesterol y glucosa. Por otro lado, la estructura más deteriorada de la C-FDI podría limitar estas propiedades funcionales en relación con la M-FDI. Esto sugiere que los tratamientos con microondas pueden mejorar las propiedades funcionales al alterar favorablemente la microestructura, incrementando la superficie efectiva y la interacción con líquidos y compuestos específicos.

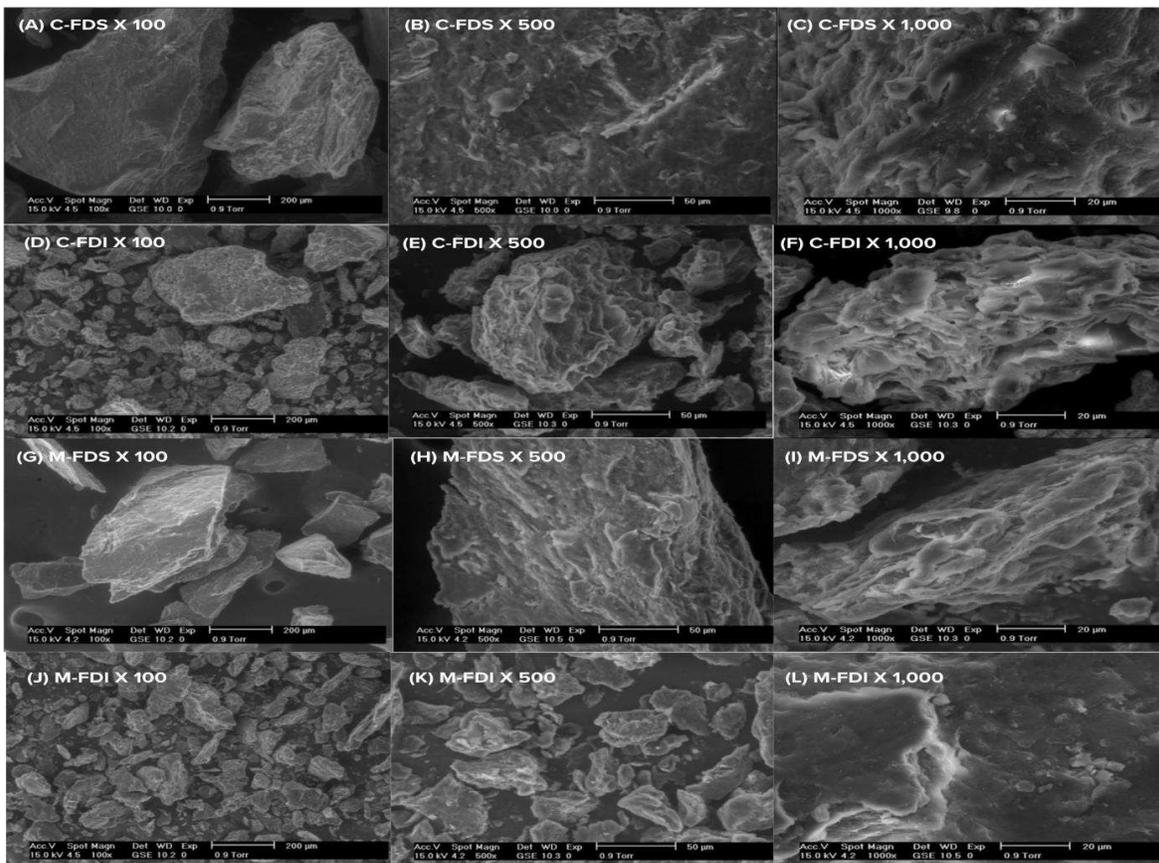


Figura 1. Micrografías SEM de FDS extraída mediante método convencional (A, B, C) y asistida por microondas (G, H, I), así como FDI extraída mediante método convencional (D, E, F) y asistida por microondas (J, K, L) a diferentes grados de aumento.

Figure 1. SEM micrographs of FDS extracted using conventional method (A, B, C) and microwave-assisted methods (G, H, I), as well as FDI extracted using conventional method (D, E, F) and microwave-assisted method (J, K, L) at different magnifications.

3.3.3 Análisis molecular (FTIR)

Los resultados de FTIR de la FD de la cáscara de naranja se muestran en la Fig. 2. En general, las muestras presentaron espectros IR bastante similares, con características espectroscópicas típicas

de los polisacáridos. No obstante, se observaron algunas variaciones en las intensidades y posiciones de los picos de varias bandas características. Todas las muestras mostraron señales fuertes alrededor de 3322 cm^{-1} , indicando vibraciones de los enlaces de hidrógeno, principalmente asociados con los grupos hidroxilo de los polisacáridos. Los picos de absorción alrededor de 2918 cm^{-1} y 2850 cm^{-1} correspondieron a las bandas de estiramiento C-H de los grupos $-\text{CH}$ o $-\text{CH}_2$ de los polisacáridos. El pico de absorción cercano a 1600 cm^{-1} correspondió a la vibración de flexión O-H característica del agua adsorbida. La intensidad de algunos picos varió según el método de extracción, lo que podría atribuirse a la ruptura de los enlaces de hidrógeno intermoleculares de los polisacáridos. El pico de absorción alrededor de 1733 cm^{-1} correspondió a la vibración de estiramiento del C=O en los grupos carboxilo ($-\text{COOH}$).

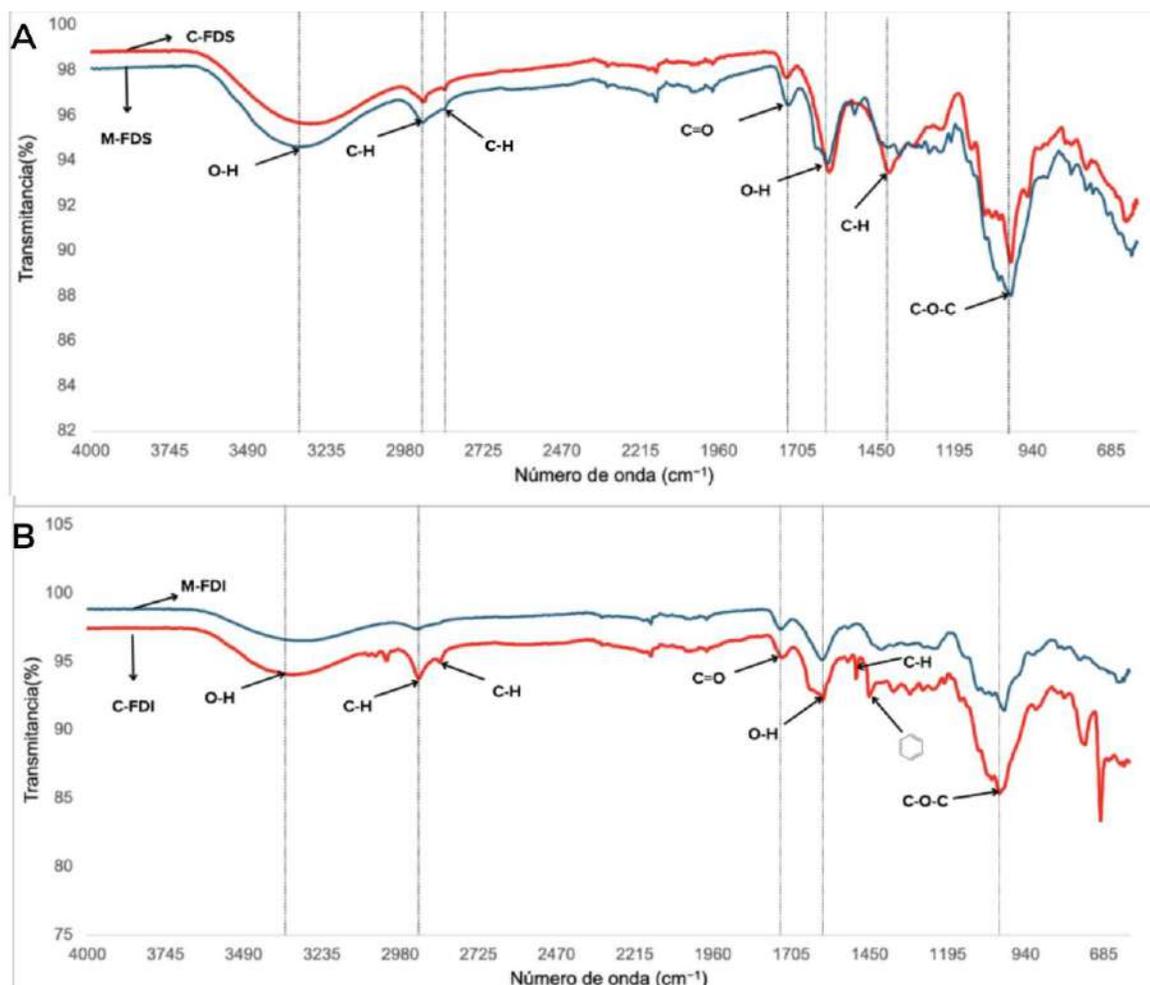


Figura 2. Espectros FTIR para FDS (A) y FDI (B) extraída de forma convencional (C-FDS y C-FDI) y por microondas (M-FDS y M-FDI).

Figure 2. FTIR spectra for FDS (A) and FDI (B) extracted conventionally (C-FDS and C-FDI) and by microwave (M-FDS and M-FDI).

Las intensidades de los picos alrededor de 1500 cm^{-1} fueron características de las vibraciones de estiramiento de los anillos aromáticos en la lignina. Estas intensidades fueron notorias en la C-FDI,

pero casi ausentes en la M-FDI y en las fibras dietarias solubles, lo que indica que el contenido de lignina es elevado en la FDI extraída de forma convencional, pero casi inexistente en las FDS. Además, el método de microondas generó una mayor hidrólisis de la lignina. El pico de absorción cercano a 1050 cm^{-1} fue característico de la vibración de estiramiento C-O de C-O-C en las unidades de azúcar del xilano (Wang *et al.*, 2022). Las intensidades de los picos alrededor de 1050 cm^{-1} fueron relativamente fuertes en la FDI y en las C-FDS, pero relativamente débiles en la M-FDI, lo que indica un contenido relativamente bajo de xilano.

3.3.4 Estructura cristalina (XRD)

En la Fig. 3 se presentan los diagramas de difracción de rayos X de la FD. En la Fig. 3 (A), se observa que los picos de difracción de las muestras de FDS fueron diferentes a los de las muestras de FDI. Los patrones de XRD revelaron que la estructura principal de las muestras de FDS de la cáscara de naranja es amorfa, lo cual concuerda con las características típicas de ese tipo de fibra (Li *et al.*, 2022). La cristalinidad de la C-FDI fue mayor en comparación con la M-FDI como se muestra en la Fig. 3 (B), lo cual podría atribuirse a que hubo una mayor reducción del contenido de lignina (Ma *et al.*, 2016).

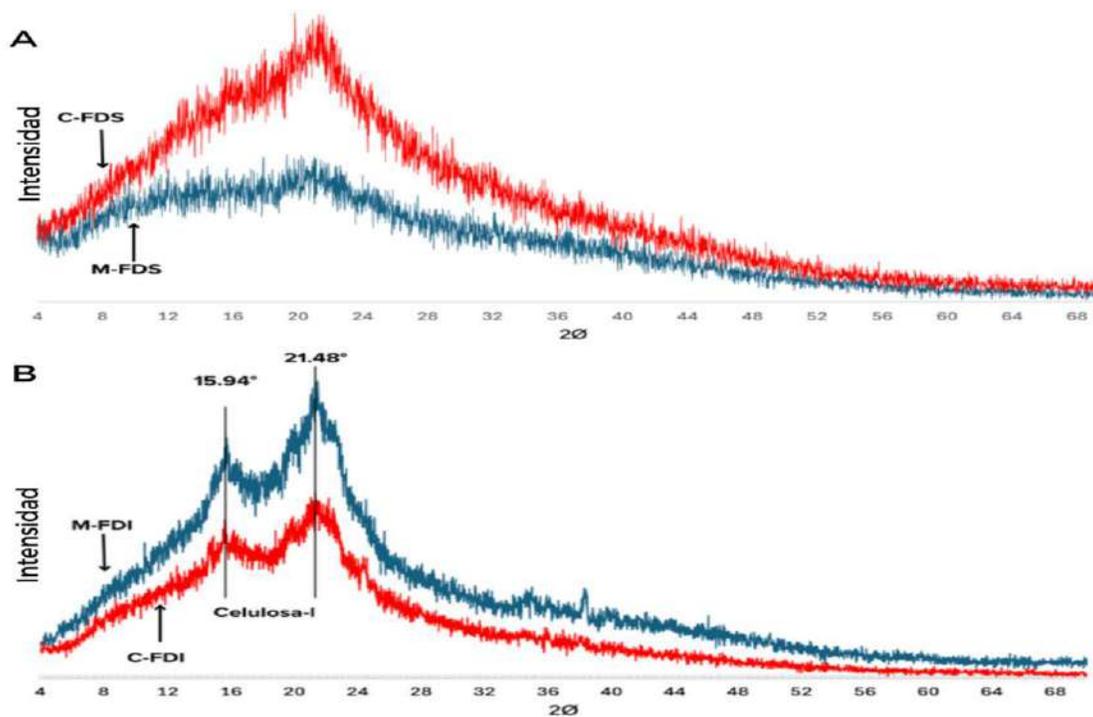


Figura 3. Diagramas de difracción de rayos X para FDS (A) y FDI (B) extraída de forma convencional (C-FDS y C-FDI) y por microondas (M-FDS y M-FDI).

Figure 3. X-ray diffraction diagrams for FDS (A) and FDI (B) extracted conventionally (C-FDS and C-FDI) and by microwave (M-FDS and M-FDI).

Al mismo tiempo, se observó que las FDI exhibieron un pico de difracción prominente a 21.48° junto con un pico de difracción menor de 15.94° en 2θ , lo cual sugiere la posible presencia de estructuras cristalinas en forma de celulosa tipo I (Ma *et al.*, 2021). Este patrón observado indica un grado similar de cristalinidad, probablemente porque las condiciones de extracción tanto convencional como asistida con microondas tuvieron poco impacto en la zona de cristalización de la FDI. Una menor cristalinidad en la FD puede mejorar su elongación y suavidad, mientras que una mayor cristalinidad puede mejorar la estabilidad térmica de las fibras cítricas (Huang *et al.*, 2021).

3.4 Propiedades funcionales

3.4.1 Solubilidad en agua

Los resultados de solubilidad en agua de la FD se presentan en la Fig. 4 (A). Una alta solubilidad en agua indica que la fibra se disuelve fácilmente, evitando formación de grumos y generando un gel con mejor viscosidad en el tracto digestivo, contribuyendo a la reducción del apetito (Dong *et al.*, 2020). La FD mostró diferencias significativas en la solubilidad, siendo mayor en M-FDS ($84 \pm 3.2\%$), en C-FDS ($77.92 \pm 2.25\%$) y en la pectina comercial ($79.73 \pm 0.095\%$). En cuanto a FDI, los valores obtenidos fueron $5.53 \pm 1.53\%$ para M-FDI, $16.4 \pm 1.50\%$ para C-FDI y 5.92% para la FDI comercial. Se observaron diferencias significativas en la FDI obtenida mediante el método convencional en comparación con las otras dos. Un bajo índice de solubilidad, indica que la fibra no se disuelve en agua, lo cual es lo que se espera de la fibra insoluble. Este tipo de fibra mantiene su estructura a lo largo del tracto digestivo, lo que es necesario para mejorar el tránsito intestinal al aumentar el volumen fecal y prevenir el estreñimiento (Soleimani *et al.*, 2022). La mayor solubilidad observada en FDI extraída mediante el método convencional, en comparación con el método de microondas, sugiere que pudo haber sufrido un daño estructural debido a los tiempos prolongados de extracción, la temperatura y el pH, haciendo que esta sea más propensa de transformar sus polisacáridos en oligosacáridos solubles (Wang *et al.*, 2022).

3.4.2 Capacidad de hinchamiento

Los resultados de la CH se muestran en la Fig. 4 (B). La CH de la FD se refiere a su habilidad para absorber agua y expandirse, aumentando así su volumen, indicando cuánta agua puede retener una fibra, influyendo en la textura y funcionalidad de los alimentos. Por ejemplo, una mayor capacidad de hinchamiento puede aumentar la viscosidad y la capacidad de formar geles, lo que es crucial para la consistencia y estabilidad de productos como salsas, pudines y productos de panadería (Soleimani *et al.*, 2022). La CH de las muestras de FD fue significativamente mayor en las muestras extraídas mediante microondas. La M-FDS mostró una CH con valor de 10.40 ± 0.35 mL/g, mientras que para la M-FDI alcanzó un valor de 8.87 ± 0.29 mL/g. Los valores de CH de la FD extraída de manera convencional, tanto para la fracción soluble como insoluble, mostraron diferencias significativas en comparación con la fibra dietaria comercial. Los valores obtenidos fueron 8.18 ± 0.25 mL/g (C-FDS), 7.66 ± 0.19 mL/g (C-FDI), 5.11 ± 0.19 mL/g (pectina comercial) y 2.11 ± 0.19 mL/g (fibra insoluble comercial). La extracción de FDS mediante microondas fue ligeramente superior a las reportadas por Khanpit *et al.* (2023), que se sitúan entre 7.24 y 9.85 mL/g. Este resultado puede atribuirse a que el tratamiento con microondas debilita la estructura interna de las fibras de naranja y rompe los enlaces de hidrógeno, lo cual podría favorecer el aumento de la capacidad de hinchamiento.

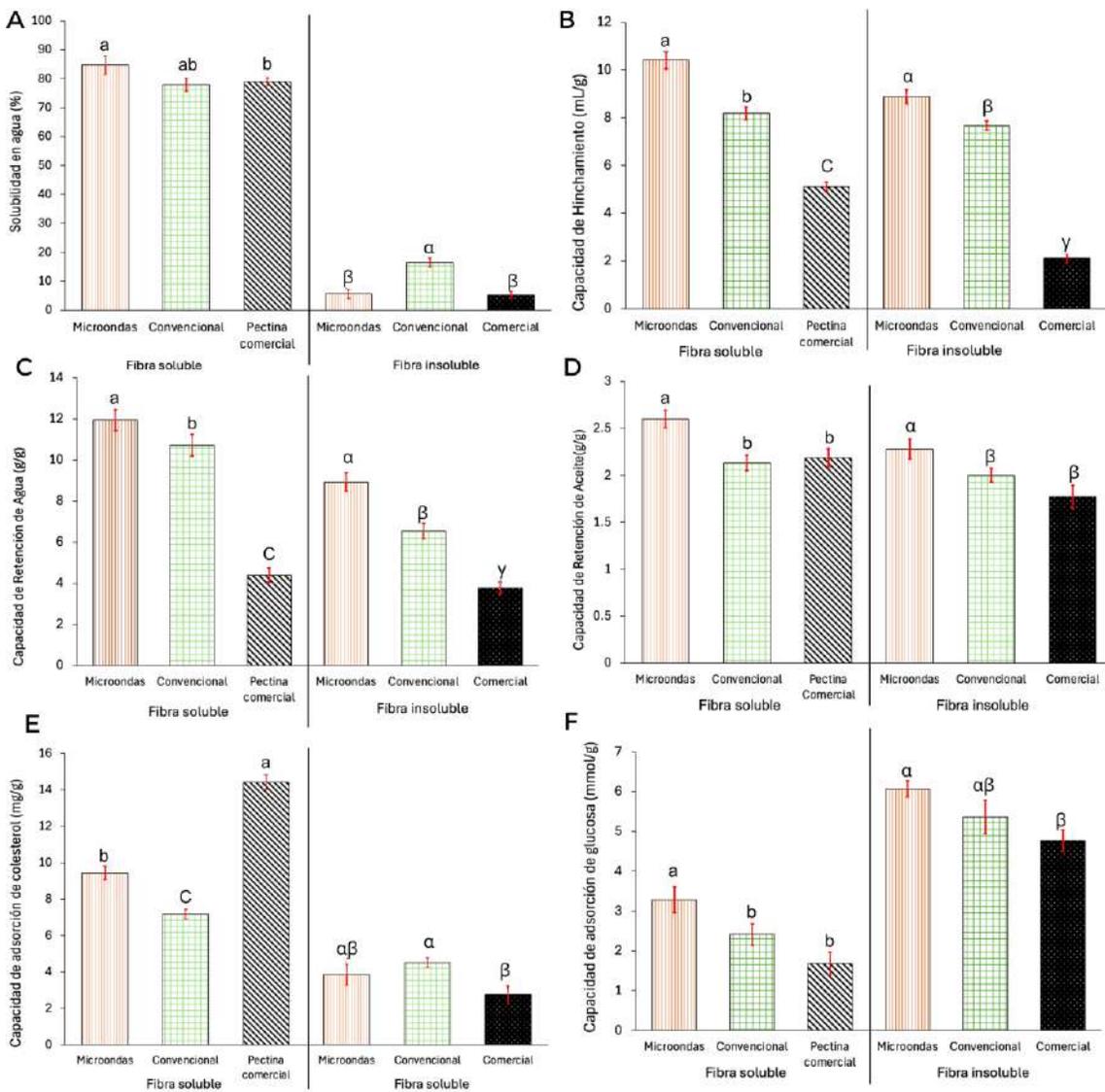


Figura 4. Propiedades funcionales de la FDS y FDI. A: Solubilidad en agua. B: capacidad de hinchamiento. C: capacidad de retención de agua. D: capacidad de retención de aceite. E: capacidad de adsorción de colesterol. F: capacidad de adsorción de glucosa. Los resultados se muestran como el promedio ± desviación estándar. Los tratamientos con letras diferentes denotan diferencias significativas. Letras latinas indican las diferencias entre métodos respecto a FDS, mientras que las letras griegas muestran las diferencias en relación con FDI (Tukey, $p < 0.05$, $n=3$).

Figure 4. Functional properties of FDS and FDI. A: Water solubility. B: Swelling capacity. C: Water holding capacity. D: Oil holding capacity. E: Cholesterol adsorption capacity. F: Glucose adsorption capacity. The results are presented as mean ± standard deviation. Treatments with different letters denote significant differences. Latin letters indicate differences between methods for FDS, while Greek letters show differences for FDI. (Tukey, $p < 0.05$, $n=3$).

3.4.3 Capacidad de retención de agua

Los resultados de la CRA se muestran en la Fig. 4 (C). La CRA es un indicador que muestra la capacidad de la FD para absorber y mantener la humedad. Valores elevados de CRA proporcionan una textura más densa y una mayor estabilidad a los productos alimenticios (Dong *et al.*, 2020). La CRA de la FD depende principalmente del número y la naturaleza de los sitios de unión al agua, así como de la microestructura de la FD (Zhou *et al.*, 2023). La CRA de las muestras de FD fue significativamente mayor en las muestras de FDS y FDI extraídas mediante microondas. El M-FDS presentó la CRA más alta para la fibra soluble, con un valor de 11.94 ± 0.52 g/g, mientras que, para la fibra insoluble, el M-FDI alcanzó un valor de 8.92 ± 0.46 g/g.

Los valores de la CRA de la fibra dietaria extraída de manera convencional, tanto para la fracción soluble como insoluble, mostraron diferencias significativas en comparación con las muestras comerciales con valores de 10.71 ± 0.54 g/g (C-FDS), 6.54 ± 0.37 g/g (C-FDI), 4.39 ± 0.34 g/g (pectina comercial) y 3.76 ± 0.27 g/g (FDI comercial). Grigelmo-Miguel y Martoín-Belloso (1999), realizaron una caracterización exhaustiva de la fibra dietaria soluble (FDS) obtenida a partir de diferentes variedades de naranja mediante métodos convencionales, reportando valores de CRA entre 7.30 y 10.32 g/g, similares a los de la extracción convencional en este estudio. Para la FDI, Khanpit *et al.* (2023) reportaron valores de 6.10 a 10.19 g/g. Estos resultados indican que la extracción asistida por microondas en este estudio muestra una mejor CRA. Esto puede deberse a que las ondas electromagnéticas exponen sitios hidrofílicos y grupos químicos adicionales, lo que incrementa la porosidad de la fibra y su hidrofiliidad (Baskaya-Sezer, 2023).

3.4.4 Capacidad de retención de aceite

Los resultados de la CRAC se muestran en la Fig. 4 (D). La CRAC muestra la cantidad de aceite o grasa que la FD puede absorber y retener físicamente, reduciendo así su absorción durante la digestión. La FD con altos valores de CRAC podrían actuar como sustitutos de la grasa en la industria alimentaria, ofreciendo una alternativa más saludable a los productos tradicionales con alto contenido de grasa (He *et al.*, 2022). El CRAC de la FD varía según el tipo de fibra, sus propiedades y el método de extracción utilizado, siendo mayor cuando la fibra presenta mejor porosidad y rugosidad. La CRAC de las muestras de FD fue significativamente mayor en las muestras de FDS y FDI que fueron extraídas por microondas. El M-FDS mostró la CRAC más alta para la fibra soluble, con un valor de 2.6 ± 0.09 g/g, mientras que, para la fibra insoluble, el M-FDI tuvo un valor de $0.10 \pm$ g/g. Los valores de CRAC para la fibra dietaria extraída convencionalmente, tanto en las fracciones soluble como insoluble, no mostraron diferencias significativas en comparación con la fibra dietaria comercial. Los valores obtenidos fueron 2.13 ± 0.08 g/g (C-FDS), 2.00 ± 0.07 g/g (C-FDI), 2.18 ± 0.09 g/g (pectina comercial) y 1.62 ± 0.06 g/g (fibra insoluble comercial). Estos valores son similares a los reportados por Huang *et al.* (2021) para fibra soluble, que fue de 2.12 ± 0.046 g/g, así como a los valores de Khanpit *et al.* (2023), que oscilaron entre 1.63 y 2.4 g/g.

3.4.5 Capacidad de adsorción de colesterol

Los resultados de la CAC se muestran en la Fig. 4 (E). El colesterol es un lípido del cuerpo humano necesario para su correcto funcionamiento, pero en cantidades excesivas es perjudicial para

la salud. Un incremento en los niveles de colesterol, especialmente las lipoproteínas de baja densidad, se acumula en las arterias, lo que aumenta el riesgo de enfermedades cardiovasculares, accidentes cerebrovasculares y enfermedades relacionadas con la mala circulación, como la enfermedad arterial periférica (He *et al.*, 2022). Uno de los beneficios más importantes de la FDS, es su capacidad para reducir los niveles de colesterol plasmático. En las muestras analizadas, la CAC de la FD fue superior en las muestras de fibra soluble obtenidas mediante extracción asistida por microondas (9.42 ± 0.35 mg/g) en comparación con la de extracción convencional (7.17 ± 0.26 mg/g), aunque inferior a la pectina comercial (14.41 ± 0.39 mg/g). Este resultado podría explicarse por el hecho de que, en condiciones ácidas, la fibra comercial muestra una mayor viscosidad, lo que facilita la adsorción de colesterol. Por otro lado, la CAC de la fibra insoluble no mostró diferencias significativas entre la extracción asistida por microondas (3.85 ± 0.56 mg/g) y la extracción convencional (4.51 ± 0.25 mmol/g). Sin embargo, la fibra insoluble comercial sí presentó diferencias significativas en comparación con la fibra obtenida por extracción convencional, con valores de 2.74 ± 0.52 mg/g.

3.4.6 Capacidad de adsorción de glucosa

Los resultados de la CAG se muestran en la Fig. 4 (F). En alimentos, la CAG de la FD varía de 0.17 mmol/g a 4.65 mmol/g. Los estudios se enfocan en la FD vegetal, y la CAG de la FD está relacionado con el metabolismo de la glucosa, porque la FD puede absorber azúcares y producir ácidos grasos de cadena corta (AGCC) por fermentación, ayudando a prevenir la diabetes (Yang *et al.*, 2022). La CAG de las muestras de FD fue mayor en las muestras de FDI en comparación con las de FDS como se observa en la Fig. 4 (F), igual a lo reportado por Wang *et al.* (2021). La CAG de M-FDI (6.07 ± 0.20 mmol/g) no mostró diferencias significativas en comparación con el C-FDI (5.36 ± 0.41 mmol/g), pero sí en comparación con la fibra comercial. Los valores de la CAG de la FDS mostraron diferencias significativas en la extracción asistida por microondas en comparación con la fibra extraída de forma convencional y la pectina comercial, con valores de 3.28 ± 0.32 mmol/g, 2.41 ± 0.26 mmol/g y 1.68 ± 0.28 mmol/g, respectivamente.

4. Conclusiones

La extracción de fibra dietaria a partir de cáscara de naranja con microondas resultó ser más eficiente, ya que se obtuvo un rendimiento de extracción de 24.33 ± 0.75 g/100 g en comparación con 14.83 ± 0.73 g/100 g obtenidos por el método convencional. La fibra obtenida por ambos métodos mostró propiedades macromoleculares óptimas; sin embargo, el uso de microondas destacó por ofrecer resultados superiores. Igualmente, las propiedades funcionales presentaron mejores valores cuando se utilizó microondas. Este estudio destaca el uso de microondas como una alternativa prometedora para obtener fibra dietética de alta calidad a partir de la cáscara de naranja, contribuyendo a su potencial valorización como residuo agroindustrial. Las fibras obtenidas podrían tener aplicaciones potenciales en la industria alimentaria como ingredientes funcionales, mejoradores de textura o agentes estabilizantes. Futuras investigaciones podrían centrarse en la incorporación de la fibra dietaria de la cáscara de naranja en matrices alimenticias, para validar su comportamiento en aplicaciones reales y proceder a un estudio de escalamiento del proceso.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, L.A.O.M. y J.M.C.; metodología, R.M.D. y L.A.O.M.; validación, R.M.D.; análisis formal, J.M.C. y R.M.D.; investigación, L.A.O.M. y R.M.D.; recursos, L.A.O.M.; redacción-redacción del borrador original, R.M.D.; redacción-revisión y edición, L.A.O.M., S.M.G.H. y J.M.C.; supervisión, L.A.O.M. y S.M.G.H.; administración del proyecto, L.A.O.M.; obtención de financiación, L.A.O.M. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Agradecimientos

El autor Ricardo Montañez Domínguez agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (Conahcyt) por la beca otorgada (No. 1267607) para estudios de Maestría en Ciencias y Tecnología de Alimentos Funcionales, en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Durango.

Conflicto de interés

Los autores afirman que no poseen intereses económicos ni vínculos personales que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

5. Referencias

- AOAC. (2005). Official methods of analysis. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- Arayici, M. E., Mert-Ozuppek, N., Yalcin, F., Basbinar, Y., & Ellidokuz, H. (2022). Soluble and insoluble dietary fiber consumption and colorectal cancer risk: A systematic review and meta-analysis. *Nutrition and Cancer* 74(7):2412-2425. <https://doi.org/10.1080/01635581.2021.2008990>
- Ayala, J. R., Montero, G., Coronado, M. A., García, C., Curiel-Alvarez, M. A., León, J. A., Sagaste, C. A., et al. (2021). Characterization of orange peel waste and valorization to obtain reducing sugars. *Molecules* 26(5):1348. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules26051348>
- Bai, X., He, Y., Quan, B., Xia, T., Zhang, X., Wang, Y., Zheng, Y., & Wang, M. (2022). Physicochemical properties, structure, and ameliorative effects of insoluble dietary fiber from tea on slow transit constipation. *Food Chemistry: X* 14:100340. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100340>
- Baskaya-Sezer, D. (2023). The characteristics of microwave-treated insoluble and soluble dietary fibers from grape and their effects on bread quality. *Food Science & Nutrition* 11(12): 7877-7886. <https://doi.org/10.1002%2Ffsn3.3705>
- Benassi, L., Alessandri, I., & Vassalini, I. (2021). Assessing green methods for pectin extraction from waste orange peels. *Molecules* 26(6):1766. <https://doi.org/10.3390/molecules26061766>
- De Lourdes, García-Magaña, M., García, H. S., Bello-Pérez, L. A., Sáyago-Ayerdi, S. G., & Mata-Montes de Oca, M. (2013). Functional properties and dietary fiber characterization of mango

- processing by-products (*Mangifera indica* L., cv Aaulfo and Tommy Atkins). *Plant Foods for Human Nutrition* 68:254–258. <https://doi.org/10.1007/s11130-013-0364-y>
- Dong, W., Wang, D., Hu, R., Long, Y., & Lv, L. (2020). Chemical composition, structural and functional properties of soluble dietary fiber obtained from coffee peel using different extraction methods. *Food Research International* 136:109497. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109497>
- Emran, T. B., Islam, F., Mitra, S., Paul, S., Nath, N., Khan, Z., Das, R., Chandran, D., Sharma, R., Lima, C. M. G., Awadh, A. A. A., Almazni, I. A., Alhasaniah, A. H., & Guiné, R. P. F. (2022). Pectin: A bioactive food polysaccharide with cancer preventive potential. *Molecules* 27(21):7405. <https://doi.org/10.3390/molecules27217405>
- Gan, J., Huang, Z., Yu, Q., Peng, G., Chen, Y., Xie, J., Nie, S., & Xie, M. (2020). Microwave assisted extraction with three modifications on structural and functional properties of soluble dietary fibers from grapefruit peel. *Food Hydrocolloids* 101:105549. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105549>
- Guan, Z. W., Yu, E. Z., & Feng, Q. (2021). Soluble dietary fiber, one of the most important nutrients for the gut microbiota. *Molecules* 26(22): 6802. <https://doi.org/10.3390/molecules26226802>
- Guo, Y., Liu, W., Wu, B., Wu, P., Duan, Y., Yang, Q., & Ma, H. (2018). Modification of garlic skin dietary fiber with twin-screw extrusion process and in vivo evaluation of Pb binding. *Food Chemistry* 268:550-557. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.047>
- Grigelmo-Miguel, N., & Martín-Belloso, O. (1998). Characterization of dietary fiber from orange juice extraction. *Food Research International* 31(5):355-361. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(98\)00087-8](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(98)00087-8)
- He, Y., Wang, B., Wen, L., Wang, F., Yu, H., Chen, D., Su, X., & Zhang, C. (2022). Effects of dietary fiber on human health. *Food Science and Human Wellness* 11(1): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.07.001>
- Huang, J. Y., Liao, J. S., Qi, J. R., Jiang, W. X., & Yang, X. Q. (2021). Structural and physicochemical properties of pectin-rich dietary fiber prepared from citrus peel. *Food Hydrocolloids* 110:106140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106140>
- Khanpit, V. V., Tajane, S. P., & Mandavgane, S. A. (2023). Orange waste peel to high value soluble dietary fiber concentrate: Comparison of conversion methods and their environmental impact. *Biomass Conversion and Biorefinery* 13(7):14413–14423. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02481-6>
- Kratchanova, M., Pavlova, E., & Panchev, I. (2004). The effect of microwave heating of fresh orange peels on the fruit tissue and quality of extracted pectin. *Carbohydrate Polymers* 56(2): 181-185. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.01.009>
- Kute, A. B., Mohapatra, D., Kotwaliwale, N., Giri, S. K., & Sawant, B.P. (2020). Characterization of pectin extracted from orange peel powder using microwave-assisted and acid extraction methods. *Agricultural Research* 9:241–248. <https://doi.org/10.1007/s40003-019-00419-5>
- Li, Y., Niu, L., Guo, Q., Shi, L., Deng, X., Liu, X., & Xiao, C. (2022). Effects of fermentation with lactic bacteria on the structural characteristics and physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from prosomillet bran. *LWT* 154:105081. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112609>

- Liu, H., Liang, J., Liang, C., Liang, G., Lai, J., Zhang, R., Wang, Q., & Xiao, G. (2022). Propiedades fisicoquímicas de la fibra dietética de la bergamota y su efecto en ratones diabéticos. *Nutrients Frontiers* 9:1040825. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1040825>
- Ma, M. M., & Mu, T. H. (2016). Effects of extraction methods and particle size distribution on the structural, physicochemical, and functional properties of dietary fiber from deoiled cumin. *Food Chemistry* 194:237–246. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.095>
- Ma, R., Chen, J. N., Zhou, X. J., Lin, H., Gao, Q., Peng, X., Tanokura, M., & Xue, Y. L. (2021). Effect of chemical and enzymatic modifications on the structural and physicochemical properties of dietary fiber from purple turnip (*Brassica rapa* L.). *LWT* 145: 111313. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111313>
- Martínez-Jiménez, A., García-Salazar, J. A., García-de los Santos, G., Ramírez-Valverde, G., Mora-Flores, J. S., & Matus-Gardea, J. A. (2020). Control of orange supply in Mexico as a mechanism to control price volatility. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43(2): 223-231. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.2.223>
- Núñez-Gómez, V., San Mateo, M., González-Barrio, R., & Periago, M. J. (2024). Chemical Composition, Functional and Antioxidant Properties of Dietary Fibre Extracted from Lemon Peel after Enzymatic Treatment. *Molecules*, 29(1): 269. <https://doi.org/10.3390/molecules29010269>
- Qiao, H., Shao, H., Zheng, X., Liu, J., Liu, J., Huang, J., Zhang, C., Liu, Z., Wang, J., & Guan, W. (2021). Modification of sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.) residues soluble dietary fiber following twin-screw extrusion. *Food Chemistry* 335:127522. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127522>
- Reynolds, A. N., Akerman, A. P., & Mann, J. (2020). Dietary fibre and whole grains in diabetes management: Systematic review and meta-analyses. *PLoS Medicine* 17(3): e1003053. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003053>
- Sang, J., Li, L., Wen, J., Gu, Q., Wu, J., Yu, Y., Xu, Y., Fu, M., & Lin, X. (2021). Evaluation of the structural, physicochemical, and functional properties of dietary fiber extracted from Newhall navel orange by-products. *Foods* 10(11): 2772. <https://doi.org/10.3390/foods10112772>
- Soleimanian, Y., Sanou, I., Turgeon, S. L., Canizares, R. M., & Elmasry, M. (2022). Natural plant fibers obtained from agricultural residue used as an ingredient in food matrixes or packaging materials: A review. *Compr Rev Food Sc Food Saf* 21(1): 371-415. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12875>
- Tan, X., Cheng, X., Ma, B., Cui, F., Wang, D., Shen, R., Li X., & Li, J. (2024). Characterization and Function Analysis of Soluble Dietary Fiber Obtained from Radish Pomace by Different Extraction Methods. *Molecules* 29(2): 500. <https://doi.org/10.3390/molecules29020500>
- Tejada-Ortigoza, V., Garcia-Amezquita, L.E., Serna-Saldívar, S.O., & Welte-Chanes, J. (2016). Advances in the functional characterization and extraction processes of dietary fiber. *Food Engineering Reviews* 8: 251–271. <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9134-y>
- Wang, K., Li, M., Wang, Y., Liu, Z., & Ni, Y. (2021). Effects of extraction methods on the structural characteristics and functional properties of dietary fiber extracted from kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). *Food Hydrocolloids* 110:106162. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106162>
- Wang, S., Chen, F., Wu, J., Wang, Z., Liao, X., & Hu, X. (2007). Optimization of pectin extraction assisted by microwave from apple pomace using response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 78(2):693-700. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.11.008>

- Wang, S., Fang, Y., Xu, Y., Zhu, B., Piao, J., Zhu, L., Yao, L., Liu, K., Wang, S., Zhang, Q., Qin, L., & Wu, J. (2022). The effects of different extraction methods on physicochemical, functional, and physiological properties of soluble and insoluble dietary fiber from *Rubus chingii* Hu. fruits. *Journal of Functional Foods* 93:105081. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105081>
- Welti-Chanes, J., Serna-Saldivar, S., Campanella, O., & Tejada-Ortigoza, V. (Eds.). (2020). *Science and technology of fibers in food systems*. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-38654-2>
- Wongkaew, M., Sommano, S. R., Tangpao, T., Rachtanapun, P., & Jantanasakulwong, K. (2020). Mango peel pectin by microwave-assisted extraction and its use as fat replacement in dried Chinese sausage. *Foods* 9(4): 450. <https://doi.org/10.3390/foods9040450>
- Wu, S., Jia, W., He, H., Yin, J., Xu, H., He, C., Zhang, Q., Peng, Y., & Cheng, R. (2023). A new dietary fiber can enhance satiety and reduce postprandial blood glucose in healthy adults: A randomized crossover trial. *Nutrients* 15(21): 4569. <https://doi.org/10.3390/nu15214569>
- Yan, J. K., Wu, L. X., Cai, W. D., Xiao, G. S., Duan, Y., & Zhang, H. (2019). Subcritical water extraction-based methods affect the physicochemical and functional properties of soluble dietary fibers from wheat bran. *Food Chemistry* 298:124987. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124987>
- Zhang, M., Bai, X., & Zhang, Z. (2011). Extrusion process improves the functionality of soluble dietary fiber in oat bran. *Journal of Cereal Science* 54(1): 98-103. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.04.001>
- Zhou, L., Luo, J., Xie, Q., Huang, L., Shen, D., & Li, G. (2023). Dietary fiber from navel orange peel prepared by enzymatic and ultrasound-assisted deep eutectic solvents: Physicochemical and prebiotic properties. *Foods* 12(10): 2007. <https://doi.org/10.3390/foods12102007>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>