



Determinación ultrasónica de compuestos fenólicos y composición química en cáscaras de sachá inchi

Ultrasonic determination of phenolic compounds and chemical composition in sachá inchi
peels

*Determinação ultrassônica de compostos fenólicos e composição química em cascas de sachá
inchi*

ARTÍCULO ORIGINAL

Cristhian Fernando Betancourth Lopez 

kristhianbetancourth@gmail.com

Universidad del Valle, Cali, Colombia



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v9i25.139>

Artículo recibido 19 de junio 2025 / Aceptado 10 de agosto 2025 / Publicado 02 de septiembre 2025

RESUMEN

Sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) es una especie oleaginosa con alto potencial comercial, cuyas cáscaras permanecen subutilizadas como subproducto. Este estudio tuvo como objetivo optimizar las condiciones de extracción ultrasónica de compuestos fenólicos de cáscaras de sachá inchi, caracterizar su composición química proximal y comparar la eficiencia del método ultrasónico con la extracción convencional Soxhlet. Se aplicó un diseño Box-Behnken de superficie de respuesta con tres factores: concentración de etanol (20-80%), relación muestra-solvente (1:40-1:100) y amplitud ultrasónica (40-80%). Las cáscaras presentaron bajo contenido de humedad, alto contenido de fibra y niveles elevados de polifenoles y flavonoides. La concentración de etanol fue el factor más significativo ($p < 0,05$). Las condiciones óptimas ($\approx 67\%$ etanol, relación 1:99 y 40% de amplitud) generaron rendimientos claramente superiores a Soxhlet, con incrementos marcados en los primeros tiempos de extracción. Se concluye que las cáscaras de sachá inchi son una fuente relevante de compuestos fenólicos y fibra, con potencial para aplicaciones nutraceuticas y alimentarias mediante tecnología ultrasónica.

Palabras clave: Cápsula; Cubierta Seminal; Extractividad; Nutraceutico; *Plukenetia Volubilis*; Ultrasonido

ABSTRACT

Sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) is an oilseed species with high commercial potential, whose shells remain underutilized as a byproduct. This study aimed to optimize the ultrasonic extraction conditions of phenolic compounds from sachá inchi shells, characterize their proximal chemical composition and compare the efficiency of the ultrasonic method with conventional Soxhlet extraction. A Box-Behnken design was applied to respond to three factors: ethanol concentration (20-80%), sample-solvent ratio (1:40-1:100) and ultrasonic amplitude (40-80%). The shells have low moisture content, high fiber content and high levels of polyphenols and flavonoids. The ethanol concentration was the most significant factor ($p < 0.05$). The optimal conditions ($\approx 67\%$ ethanol, ratio 1:99 and 40% amplitude) generated yields clearly superior to Soxhlet, with marked increases in the first extraction times. It is concluded that the sachá inchi shells are a relevant source of phenolic compounds and fiber, with potential for nutritional and food applications using ultrasonic technology.

Keywords: Capsule; Seed Coat; Extractability; Nutraceutical; *Plukenetia Volubilis*; Ultrasound

RESUMO

Sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) é uma espécie oleaginosa com alto potencial comercial, cujas cáscaras permanecem subutilizadas como subproduto. Este estudo tem como objetivo otimizar as condições de extração ultrassônica de compostos fenólicos de cáscaras de sachá inchi, caracterizar sua composição química proximal e comparar a eficiência do método ultrassônico com a extração convencional Soxhlet. Foi aplicado um design Box-Behnken de superfície de resposta com três fatores: concentração de etanol (20-80%), relação amostra-solvente (1:40-1:100) e amplitude ultrassônica (40-80%). As cáscaras apresentam baixo teor de umidade, alto teor de fibra e níveis elevados de polifenóis e flavonoides. A concentração de etanol foi o fator mais significativo ($p < 0,05$). As condições ótimas ($\approx 67\%$ de etanol, relação 1:99 e 40% de amplitude) geraram resultados claramente superiores a Soxhlet, com incrementos marcados nos primeiros tempos de extração. Conclui-se que as cáscaras de sachá inchi são uma fonte relevante de compostos fenólicos e fibra, com potencial para aplicações nutraceuticas e alimentares através de tecnologia ultrassônica.

Palavras-chave: Cápsula; Cobertura Seminal; Extratividade; Nutraceutico; *Plukenetia Volubilis*; Ultrassom

INTRODUCCIÓN

El sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) es una especie oleaginosa trepadora perteneciente a la familia Euphorbiaceae, nativa de la región amazónica y distribuida en países como Bolivia, Perú y Colombia (Alayón y Echeverri Jiménez, 2016). Esta especie ha experimentado un creciente interés comercial debido a sus semillas ricas en ácidos grasos omega-3, omega-6 y omega-9, así como por su contenido proteico superior al 30% (Chirinos et al., 2016). Además, desde una perspectiva global, el sachá inchi representa un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria y nutricional, especialmente considerando el déficit mundial de omega-3 en las dietas actuales. En consecuencia, el aprovechamiento integral de todos los componentes de la planta, incluidos sus subproductos, se vuelve fundamental para maximizar la sostenibilidad y rentabilidad del cultivo.

En este contexto, la producción mundial de sachá inchi ha mostrado un crecimiento exponencial en la última década, especialmente en países como Perú, que se ha consolidado como el principal productor mundial con más de 15,000 hectáreas cultivadas (Preciado et al., 2021). En Colombia, específicamente en el departamento de Putumayo, se ha desarrollado un programa de cultivo que abarca aproximadamente 2,500 hectáreas, posicionando al país como el segundo productor mundial (Vásquez et al., 2017). Sin embargo, este crecimiento no ha estado acompañado de estrategias integrales de aprovechamiento,

limitando el potencial económico de la cadena productiva.

De manera particular, la problemática específica del municipio de Puerto Caicedo en Putumayo ilustra claramente los desafíos que enfrenta la cadena productiva del sachá inchi a nivel regional. La expansión del cultivo en el departamento de Putumayo, que cuenta con aproximadamente 2,500 hectáreas distribuidas en varios municipios incluida Puerto Caicedo (Vásquez et al., 2017), ha generado un crecimiento acelerado en la producción de semillas oleaginosas. Sin embargo, este crecimiento ha estado acompañado de la generación de subproductos sin aprovechamiento comercial. Por cada tonelada de semillas procesadas, se generan aproximadamente 150 kg de cáscaras que actualmente son consideradas residuo y se desechan en botaderos a cielo abierto o se queman, causando contaminación del suelo y aire. Esta situación resulta especialmente preocupante, ya que contrasta con el potencial económico que representan estos subproductos. La implementación de tecnologías de extracción eficientes podría generar ingresos adicionales del 20-25% para los productores (Aliakbarian et al., 2018). Asimismo, la falta de conocimientos técnicos sobre tecnologías de extracción de compuestos bioactivos y la ausencia de centros de investigación aplicada en la región limitan el desarrollo de alternativas sostenibles de aprovechamiento integral del cultivo, perpetuando un modelo productivo lineal que no maximiza el potencial económico del recurso

oleaginoso local.

En relación con este aprovechamiento limitado, el uso actual del sachá inchi se centra principalmente en la extracción de aceite de las semillas, proceso que genera dos subproductos principales: la torta (aproximadamente 70% del peso seco de la semilla) y las cáscaras (10-15% del peso del fruto). Mientras que la torta ha encontrado aplicaciones en la industria alimentaria y de suplementos, las cáscaras han sido subutilizadas, considerándose principalmente como residuo (Benítez et al., 2015). En este sentido, la situación descrita contrasta con tendencias globales hacia la economía circular, un modelo productivo que promueve la valorización integral de los subproductos agroindustriales como estrategia para reducir el impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad económica.

Por otra parte, las cáscaras de sachá inchi representan un potencial económico significativo si se considera que por cada tonelada de semillas procesadas se generan aproximadamente 150 kg de cáscaras (Chirinos et al., 2016). Estudios recientes han identificado que estas cáscaras contienen compuestos bioactivos de alto valor, incluyendo polifenoles, flavonoides y fibra dietética, componentes que pueden ser aprovechados en aplicaciones nutracéuticas, farmacéuticas y alimentarias (Quirós Sauceda et al., 2011). Desde un enfoque global, esta valorización cobra especial relevancia considerando que el mercado global de extractos vegetales naturales ha alcanzó los 35.2 mil millones USD en 2024, con proyecciones de

crecimiento anual del 8.5% hasta 2030 (Zhang et al., 2024).

En cuanto al aspecto tecnológico, la extracción asistida por ultrasonido (UAE) ha emergido como una técnica promisorio para la obtención de compuestos bioactivos de matrices vegetales (Chemat et al., 2017). Esta metodología ofrece ventajas significativas sobre los métodos convencionales, incluyendo menores tiempos de extracción, mayor rendimiento, menor consumo de solventes y mejor preservación de compuestos termosensibles (Medina et al., 2017). Los mecanismos involucrados en la UAE incluyen cavitación acústica, que genera burbujas microscópicas que colapsan violentamente, creando zonas de alta temperatura y presión que facilitan la ruptura de la matriz celular y mejoran la transferencia de masa (Muñiz et al., 2013). Esta tecnología ha revolucionado la extracción de bioactivos en múltiples regiones, desde Europa hasta Asia-Pacífico, demostrando su versatilidad y efectividad.

De acuerdo con lo anterior, estudios recientes (2020-2025) han optimizado parámetros de UAE para diversos subproductos ricos en fenoles a nivel internacional. Por ejemplo, Silva et al. (2022) optimizaron la extracción de polifenoles de cáscaras de cacao obteniendo rendimientos de 8,450 mg EAG/100g usando 50% etanol, ratio 1:50 y 60% amplitud en estudios realizados en Brasil. Similarmente, García et al. (2023) reportaron extracción de flavonoides de cáscaras de almendra con 60% etanol, ratio 1:80 y 70% amplitud, alcanzando 5,234 mg CE/100g en investigaciones mexicanas.

En paralelo, investigaciones europeas han demostrado la efectividad de la UAE en residuos de aceitunas mediterráneas (Rossi et al., 2023), mientras que estudios asiáticos han optimizado la extracción de polifenoles de subproductos del té verde en China (Wang et al., 2024), y cáscaras de cítricos tropicales en India (Patel et al., 2025), estableciendo protocolos replicables a nivel global.

Del mismo modo, las cáscaras de sachá inchi presentan características composicionales comparables con otros subproductos agroindustriales de alto valor comercializados internacionalmente. Por ejemplo, las cáscaras de uva, ampliamente estudiadas en Europa y América del Norte, contienen 15-25% de polifenoles totales, mientras que los peels de cítricos alcanzan concentraciones de 8-18% en mercados asiáticos y latinoamericanos. No obstante, las cáscaras de sachá inchi exhiben un contenido de fibra superior (65-75%) que puede actuar como portador natural de compuestos fenólicos, mejorando su estabilidad y biodisponibilidad (Martínez et al., 2014). En virtud de esta combinación única, las cáscaras de sachá inchi se posicionan como un subproducto con potencial de competitividad global, especialmente en mercados especializados de ingredientes funcionales y nutraceuticos.

A la luz de estas evidencias, la creciente demanda internacional de ingredientes naturales con propiedades antioxidantes ha generado interés en la valorización de subproductos agroindustriales como estrategia de economía circular. Las cáscaras de sachá inchi,

tradicionalmente desechadas, representan una oportunidad para generar valor agregado en la cadena productiva del cultivo, contribuyendo a la competitividad del sector oleaginoso nacional. Sin embargo, la falta de metodologías eficientes para la extracción de sus compuestos bioactivos limita su aprovechamiento comercial (Díaz et al., 2020). Frente a esta problemática, la tecnología ultrasónica ofrece una alternativa sostenible y eficiente para extraer estos compuestos, contribuyendo a la economía circular del sector oleaginoso y posicionando al departamento de Putumayo como un centro regional de valorización agroindustrial

En consonancia con lo anterior, la importancia económica de estos subproductos se ha demostrado en otros cultivos oleaginosos a nivel global, donde la valorización de residuos agroindustriales puede incrementar el valor agregado de la cadena productiva en un 15-30%. En el caso específico del sachá inchi, la implementación de tecnologías de extracción eficientes podría generar ingresos adicionales de 2,000-3,500 USD por hectárea cultivada (Aliakbarian et al., 2018). Esta perspectiva se alinea con las tendencias globales hacia la bioeconomía circular, donde la transformación de residuos en productos de alto valor agregado se ha consolidado como una estrategia empresarial exitosa. Por lo tanto, el desarrollo de metodologías optimizadas para la extracción de compuestos bioactivos de las cáscaras de sachá inchi representa una oportunidad estratégica para mejorar la competitividad y sostenibilidad del sector oleaginoso colombiano.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo optimizar las condiciones de extracción ultrasónica de compuestos fenólicos procedentes de cáscaras de sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) mediante metodología de superficie de respuesta, evaluar su composición química proximal, comparar la eficiencia del método ultrasónico con la extracción convencional Soxhlet, y establecer las condiciones operativas óptimas para determinar su potencial como fuente de ingredientes funcionales en aplicaciones nutraceuticas, cosméticas y alimentarias, contribuyendo así al aprovechamiento integral de este recurso oleaginoso y al desarrollo sostenible del sector agroindustrial regional.

MÉTODO

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, descriptivo y de diseño experimental. Para evaluar la influencia de tres variables independientes (concentración de etanol, relación muestra-solvente y amplitud ultrasónica) sobre las variables respuesta (polifenoles totales y flavonoides totales), se implementó la metodología de superficie de respuesta (MSR) aplicando un diseño Box-Behnken (BBD) de tres factores y tres niveles (Barrios et al., 2020).

En cuanto al área de estudio, la etapa experimental se desarrolló en dos ubicaciones del departamento de Putumayo, Colombia. La recolección de semillas de sachá inchi se realizó en el municipio de Puerto Caicedo (0°41'00"N, 76°32'00"W; 280 msnm, 26 °C promedio, 85% de humedad relativa), mientras que el

procesamiento y análisis de las muestras se efectuó en el laboratorio del Instituto Tecnológico del Putumayo, en Mocoa (1°09'00"N, 76°58'00"W; 354 msnm, 24 °C, 88% de humedad relativa). Las semillas se recolectaron durante la época de cosecha (marzo-mayo 2024) en cultivos comerciales y, posteriormente, se separaron manualmente las cáscaras bajo condiciones asépticas en un área ventilada a 20±2 °C y 45-50% de humedad relativa.

Seguidamente, las cáscaras se lavaron con agua destilada para eliminar impurezas superficiales, se secaron al aire bajo sombra durante 48 horas y se molieron en un molino de cuchillas (IKA A11 basic). A continuación, el material molido se tamizó mediante malla de acero inoxidable de 1 mm de apertura y el polvo resultante se almacenó en frascos de vidrio ámbar herméticos, previamente esterilizados, conservándose a 4 °C hasta su análisis, con el fin de preservar la estabilidad de los compuestos bioactivos.

La caracterización proximal se realizó siguiendo métodos estandarizados de AOAC International (2019), lo que garantiza comparabilidad con otros estudios. La humedad se determinó gravimétricamente empleando 5 g de muestra fresca, con secado inicial a 65 °C durante 12 horas y posterior secado a 105 °C hasta peso constante, calculando el porcentaje mediante $\% \text{Humedad} = ((\text{peso fresco} - \text{peso seco}) / \text{peso fresco}) \times 100$. Las cenizas se obtuvieron por calcinación en horno mufla (Thermo Scientific 3040) a 550 °C durante 6 horas, expresándose el contenido como

porcentaje respecto a la muestra seca. El extracto etéreo se determinó por extracción Soxhlet con éter de petróleo durante 8 horas, con alrededor de 6 ciclos de reflujo por hora, y el resultado se expresó en base seca. El contenido de fibra cruda se determinó mediante digestión secuencial ácido alcalina (H_2SO_4 1,25% y NaOH 1,25%), seguida de secado del residuo a 130 ± 2 °C y calcinación a 525 ± 15 °C durante 3 horas. La proteína se evaluó por el método Kjeldahl usando digestor y destilador automáticos (Velp UDK 159), aplicando un factor de 6,25 para convertir nitrógeno total a proteína, mientras que el extracto no nitrogenado se calculó por diferencia.

Para garantizar la precisión de las mediciones, se emplearon un ultrasonido Sonic & Materials modelo VCX-130 con frecuencia 20 kHz y potencia máxima 130 W, un espectrofotómetro Thermo Scientific Genesys 180 (rango 190-1100 nm), un horno mufla Thermo Scientific modelo 3040, un analizador de nitrógeno Velp Scientific UDK 159, una centrífuga Eppendorf 5810 R (hasta 4,500 rpm), un baño maría Memmert WNB 22 (10-95 °C) y un pH-metro Mettler Toledo S470 con precisión ± 0.002 . Esta descripción de equipos permite la replicación en otros laboratorios con capacidades similares.

En relación con la extracción de compuestos fenólicos, se empleó un sistema de ultrasonido de inmersión, en el que se evaluaron tres factores con sus niveles: concentración de etanol (% v/v) de 20, 50 y 80%; relación muestra-solvente (p/v) de 1:40, 1:70 y 1:100; y amplitud ultrasónica (%) de 40, 60 y 80. Para cada

experimento, se pesaron 2 g de muestra seca en vasos de precipitado de 250 mL, se agregó el solvente según la relación correspondiente, y se sometió a sonicación bajo las condiciones establecidas. La temperatura se mantuvo a 60 ± 2 °C mediante baño maría durante 90 minutos de tratamiento.

Después de la sonicación, los extractos se centrifugaron a 10,000 rpm durante 15 minutos en centrífuga refrigerada (4°C) y se filtraron a través de papel Whatman No. 1. Los sobrenadantes se almacenaron a -18°C hasta su análisis. Paralelamente, la extracción Soxhlet se realizó como método de referencia bajo las siguientes condiciones: 2 g de muestra seca en cartucho de celulosa, 200 mL de etanol al 70%, temperatura de ebullición del solvente (78°C), y tiempo de extracción de 8 horas con 6 ciclos de reflujo por hora (Casagrande et al., 2015).

En cuanto a las determinaciones analíticas, los polifenoles totales se determinaron mediante el método Folin-Ciocalteu modificado (Ordoñez et al., 2018), donde se tomaron 100 μ L de extracto, se agregaron 7.9 mL de agua destilada y 500 μ L de reactivo Folin-Ciocalteu (Merck, 1N). Después de 5 minutos de reacción, se agregaron 1.5 mL de solución saturada de Na_2CO_3 (200 g/L). La mezcla se incubó en oscuridad durante 2 horas a temperatura ambiente y la absorbancia se midió a 760 nm en espectrofotómetro. Los resultados se expresaron como miligramos de equivalentes de ácido gálico por 100 gramos de materia seca (mg EAG/100g MS), utilizando una curva de calibración con ácido gálico (10-100 mg/L, $R^2 = 0.998$).

Por su parte, los flavonoides totales se determinaron mediante el método colorimétrico con $\text{NaNO}_2\text{-AlCl}_3$ (Zhishen et al., 1999), mezclando 50 μL de extracto con 1.25 mL de agua destilada y 75 μL de NaNO_2 al 5% (p/v). Después de 5 minutos de reposo, se agregaron 150 μL de AlCl_3 al 10% (p/v) y 500 μL de NaOH 1M, completando el volumen a 3 mL con agua destilada. La absorbancia se midió a 510 nm y los resultados se expresaron como miligramos de equivalentes de catequina por 100 gramos de materia seca (mg CTE/100g MS), utilizando una curva de calibración con catequina (10-100 mg/L, $R^2 = 0.996$).

Adicionalmente, la capacidad antioxidante se evaluó mediante dos métodos: el DPPH, donde se mezclaron 50 μL de extracto con 1950 μL de solución de DPPH 100 μM en metanol, se incubó en oscuridad a temperatura ambiente durante 30 minutos, y la absorbancia se midió a 517 nm, expresándose la capacidad antioxidante como porcentaje de inhibición del radical mediante la ecuación:

$\% \text{ Inhibición} = ((A_{\text{control}} - A_{\text{muestra}}) / A_{\text{control}}) \times 100$. En el ensayo $\text{ABTS}^{+\bullet}$ (Diaz-Urbe et al., 2020), donde se preparó una solución stock de $\text{ABTS}^{+\bullet}$ 7 mM con persulfato de potasio 2.45 mM, se dejó reaccionar en oscuridad durante 12-16 horas, se diluyó con etanol hasta obtener una absorbancia de 0.700 ± 0.020 a 734 nm, se mezclaron 980 μL de esta solución con 20 μL de extracto, y se midió la absorbancia después de 15 minutos de reacción a 734 nm. Los resultados se expresaron como equivalentes de Trolox (μM) utilizando una curva

de calibración con Trolox (0.1-1.0 mM, $R^2 = 0.995$).

Finalmente, el análisis de datos se realizó utilizando el software SPSS versión 28.0 y Design Expert versión 13.0. Los datos se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Las superficies de respuesta se generaron mediante regresión polinomial de segundo orden:

$$Y = \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \beta_{11}X_1^2 + \beta_{22}X_2^2 + \beta_{33}X_3^2 + \beta_{12}X_1X_2 + \beta_{13}X_1X_3 + \beta_{23}X_2X_3$$

Donde Y representa la variable respuesta, X_1 , X_2 , X_3 las variables independientes, y β los coeficientes de regresión. La calidad del ajuste se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2), R^2 ajustado, y el valor de F del modelo. La optimización múltiple se realizó maximizando simultáneamente el contenido de polifenoles totales y flavonoides totales, estableciendo restricciones para cada variable independiente dentro de los rangos experimentales. La validación de las condiciones óptimas se realizó mediante tres extracciones independientes bajo las condiciones predichas.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran el potencial significativo de las cáscaras de sachá inchi como fuente de compuestos bioactivos y su viabilidad para la extracción optimizada mediante tecnología ultrasónica. La caracterización proximal reveló una composición química favorable para el aprovechamiento industrial, mientras que la optimización mediante metodología de superficie de respuesta permitió

identificar condiciones de extracción que superan claramente al método convencional.

En particular, los hallazgos evidencian que la extracción asistida por ultrasonido, bajo las condiciones optimizadas, logra rendimientos de polifenoles totales de $5346,89 \pm 16,88$ mg EAG/100g MS y flavonoides totales de $6824,68 \pm 15,79$ mg CTE/100g MS, representando incrementos de hasta 8 veces comparado con el método Soxhlet tradicional, lo cual confirma la

superioridad de esta tecnología para la valorización de este subproducto agroindustrial.

Caracterización proximal de las cáscaras de sachá inchi

La composición química proximal de las cáscaras de sachá inchi se presenta en la Tabla 1. El contenido de humedad fue relativamente bajo ($9,53 \pm 0,08\%$), condición que resulta favorable para el almacenamiento y el posterior procesamiento del material, al reducir el riesgo de deterioro microbiológico y oxidativo.

Tabla 1. Composición proximal de las cáscaras de sachá inchi

Parámetro	Contenido % (b.s.)	Error estándar
Proteína	$2,03 \pm 0,02$	0,01
Extracto etéreo	$2,02 \pm 0,02$	0,01
Cenizas	$1,73 \pm 0,03$	0,02
Fibra cruda	$69,94 \pm 0,03$	0,02
Extracto no nitrogenado	$24,28 \pm 0,02$	0,01

Nota: Valores promedio \pm desviación estándar ($n=3$). b.s.: base seca.

El contenido de fibra cruda ($69,94 \pm 0,03\%$) constituyó el componente mayoritario, seguido por el extracto no nitrogenado ($24,28 \pm 0,02\%$), mientras que proteína ($2,03 \pm 0,02\%$), extracto etéreo ($2,02 \pm 0,02\%$) y cenizas ($1,73 \pm 0,03\%$) presentaron valores relativamente bajos, característicos de matrices vegetales con alta proporción de fibra dietética. Esta composición refuerza la idea de que las cáscaras de sachá inchi pueden funcionar como matriz portadora de compuestos fenólicos, con potencial para aplicaciones funcionales.

Diseño experimental Box-Behnken

En la etapa de optimización, se ejecutaron 17 experimentos del diseño Box–Behnken para evaluar el efecto de la concentración de etanol (X_1), la relación muestra-solvente (X_2) y la amplitud ultrasónica (X_3) sobre el contenido de polifenoles totales y flavonoides totales (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados experimentales del diseño Box-Behnken para extracción de compuestos fenólicos

Exp.	X ₁ Etanol (%)	X ₂ Ratio (p/v)	X ₃ Amplitud (%)	Polifenoles totales (mg EAG/100g MS)	Flavonoides totales (mg CTE/100g MS)
1	80	80	1:70	5023,10 ± 92,85	5842,82 ± 49,74
2	60	20	1:40	2366,31 ± 53,06	2700,82 ± 33,27
3	60	80	1:40	4634,46 ± 35,09	5713,65 ± 48,62
4	40	50	1:40	3953,58 ± 27,61	5359,95 ± 14,47
5	40	50	1:100	5418,37 ± 33,16	6096,73 ± 41,03
6	80	50	1:40	4294,02 ± 46,58	6026,31 ± 10,94
7	60	50	1:70	4992,15 ± 48,32	6207,58 ± 16,58
8	40	80	1:70	5216,54 ± 35,46	6003,09 ± 9,57
9	40	20	1:70	3189,34 ± 46,42	3167,90 ± 34,51
10	60	50	1:70	4992,15 ± 87,88	6246,27 ± 34,51
11	60	20	1:100	2557,75 ± 19,15	3349,18 ± 47,37
12	60	80	1:100	5097,82 ± 106,59	6278,32 ± 49,31
13	60	50	1:70	4992,15 ± 35,46	6213,11 ± 74,76
14	60	50	1:70	4976,68 ± 23,21	6207,58 ± 75,98
15	80	50	1:100	5385,21 ± 66,32	6515,18 ± 68,38
16	60	50	1:70	4984,41 ± 26,80	6207,58 ± 28,72
17	80	20	1:70	3059,36 ± 15,47	3607,46 ± 27,82

Nota: Valores expresados como la media ± desviación estándar ($n = 3$).

Los resultados mostraron una variabilidad amplia en los rendimientos de extracción: los polifenoles totales oscilaron entre 2366,31 ± 53,06 mg EAG/100 g MS (experimento 2) y 5418,37 ± 33,16 mg EAG/100 g MS (experimento 5), mientras que los flavonoides totales variaron entre 2700,82 ± 33,27 mg CTE/100 g MS (experimento 2) y 6515,18 ± 68,38 mg CTE/100 g MS (experimento 15).

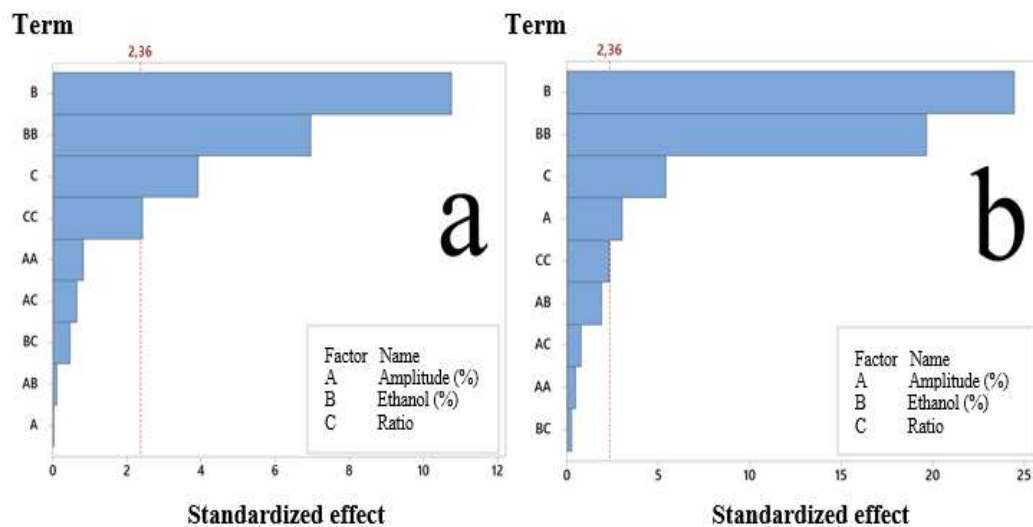
Esta amplitud de respuesta indica una sensibilidad marcada a las condiciones de extracción, lo cual justifica el uso de un diseño de superficie de respuesta para identificar combinaciones óptimas de solvente, relación sólido-líquido y amplitud ultrasónica, tal como se ha reportado en otros sistemas de extracción de compuestos fenólicos.

Análisis estadístico y modelos de regresión

El análisis de varianza (ANOVA) mostró que el modelo de segundo orden fue significativo ($p < 0,05$) para ambas variables respuesta. Los diagramas de Pareto (Figura 1) indican que el término lineal de la concentración de etanol fue

el factor más influyente ($p < 0,05$) para polifenoles y flavonoides totales, seguido por los términos cuadráticos de esta misma variable y por el término lineal de la relación muestra-solvente.

Figura 1. Efectos estandarizados del diagrama de Pareto ($\alpha = 0,05$): a) polifenoles totales, b) flavonoides totales



Los modelos de regresión obtenidos fueron:

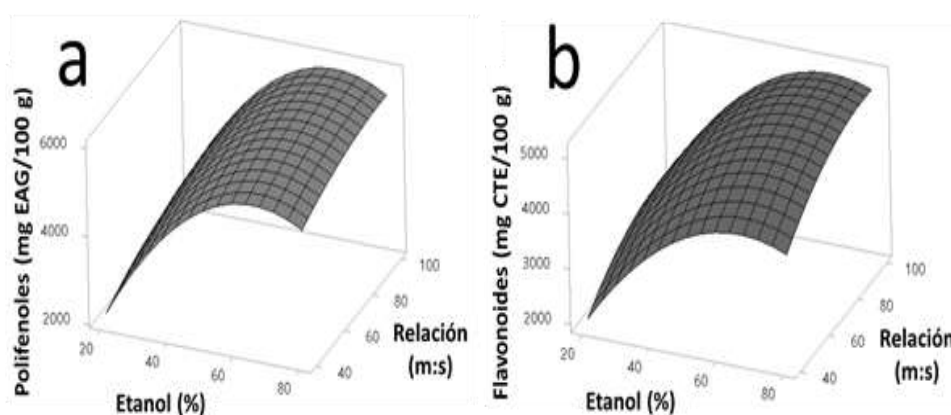
Los modelos de regresión ajustados para polifenoles (Y_1) y flavonoides (Y_2) totales incluyeron términos lineales, cuadráticos e interacciones entre X_1 , X_2 y X_3 , describiendo adecuadamente la respuesta dentro del espacio experimental. Los valores de R^2 de 0,9456 para polifenoles y 0,9512 para flavonoides indican un buen ajuste de los modelos a los datos experimentales en el contexto de estudios de superficie de respuesta en sistemas físico-químicos, donde valores superiores a 0,90 suelen considerarse aceptables. Esto confirma que las ecuaciones propuestas son apropiadas para predecir el comportamiento del sistema y

guiar la selección de condiciones óptimas de extracción.

Superficies de respuesta

Las superficies de respuesta (Figura 2) muestran el comportamiento de las variables respuesta en función de la concentración de etanol y la relación muestra-solvente, manteniendo la amplitud en su nivel central (60%).

Figura 2. Superficie de respuesta: a) Polifenoles Totales vs Concentración de Etanol y Relación m:s, b) Flavonoides Totales vs Concentración de Etanol y Relación m:s. Valores fijos de amplitud



Las superficies de respuesta (Figura 2) muestran que ambas variables (polifenoles y flavonoides totales) exhiben un comportamiento similar, con máximos en el rango de 60-70% de concentración de etanol y relaciones muestra-solvente superiores a 1:80. A medida que la concentración de etanol supera el 70%, el rendimiento de extracción disminuye, lo que puede asociarse a efectos de deshidratación de la matriz y colapso celular, que reducen la difusión de los compuestos fenólicos hacia el solvente.

Condiciones óptimas y validación

Basándose en la optimización múltiple mediante el criterio de deseabilidad, las condiciones óptimas predichas fueron: 67,27% de etanol, relación muestra-solvente 1:99, y 40% de amplitud ultrasónica. Bajo estas condiciones, los valores estimados fueron 5342,15 mg EAG/100 g MS para polifenoles totales y 6831,44 mg CTE/100 g MS para flavonoides totales, lo que sitúa a este sistema en el rango superior de rendimientos reportados para matrices vegetales con extracción asistida por ultrasonido.

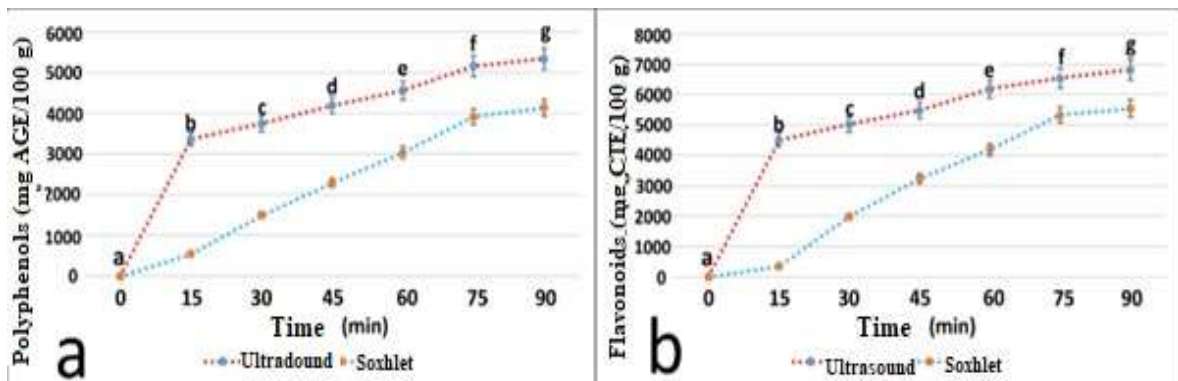
La validación experimental bajo las condiciones óptimas (tres extracciones independientes) arrojó valores de $5346,89 \pm 16,88$ mg EAG/100 g MS para polifenoles totales y $6824,68 \pm 15,79$ mg CTE/100 g MS para flavonoides totales, muy cercanos a los valores predichos. Estos resultados se ubicaron dentro del intervalo de confianza del 95% de las predicciones del modelo, lo que confirma la capacidad predictiva de las ecuaciones de superficie de respuesta y la pertinencia de las condiciones seleccionadas.

Comparación con método Soxhlet

La comparación entre la extracción ultrasónica optimizada y el método Soxhlet (Figura 3), evidencia que la tecnología ultrasónica alcanzó rendimientos significativamente superiores en todos los métodos evaluados. En particular, se observaron incrementos de hasta ocho veces en los primeros 15-30 minutos de tratamiento respecto a Soxhlet, lo que pone de manifiesto la mayor eficiencia cinética de la cavitación ultrasónica para la liberación de

compuestos fenólicos.

Figura 3. Extracción ultrasónica vs. Soxhlet: a) Polifenoles totales, b) Flavonoides totales. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0,05$)



Nota: Valores promedio \pm desviación estándar ($n=3$).

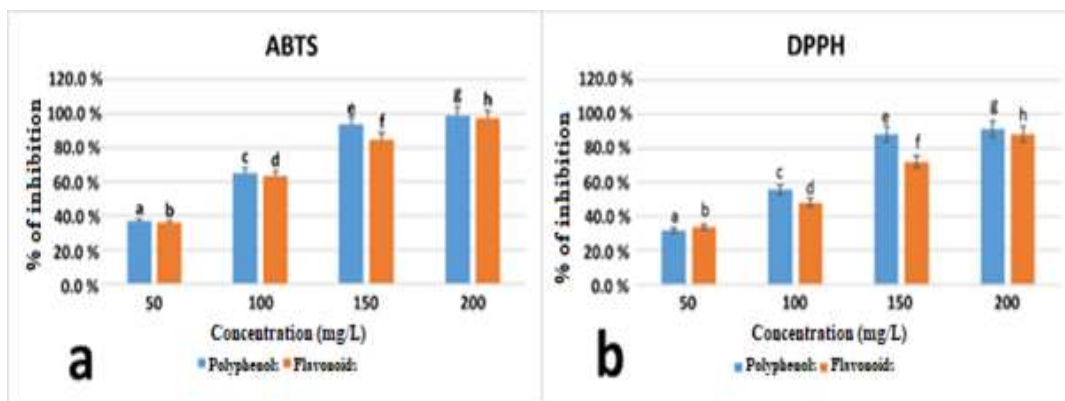
El análisis estadístico mediante ANOVA reveló diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambos métodos en cada punto de muestreo, mientras que la prueba de comparaciones múltiples de Tukey confirmó que los rendimientos alcanzados con extracción ultrasónica fueron consistentemente superiores. Estos resultados coinciden con reportes previos donde la extracción asistida por ultrasonido supera a métodos convencionales tanto en rendimiento como en reducción del tiempo de proceso

Actividad antioxidante

La evaluación de la capacidad antioxidante de los extractos obtenidos bajo las condiciones óptimas (Figura 4) mostró una correlación positiva entre la concentración de compuestos fenólicos y la actividad antioxidante medida por DPPH y ABTS. Los extractos obtenidos por ultrasonido alcanzaron una inhibición del radical

DPPH de $78,5 \pm 2,3\%$ y $285,6 \pm 12,4 \mu\text{M}$ equivalentes de Trolox en el ensayo ABTS, mientras que los extractos por Soxhlet presentaron $65,2 \pm 3,1\%$ de inhibición DPPH y $198,3 \pm 15,7 \mu\text{M}$ equivalentes de Trolox

Figura 4. Actividad antioxidante según la concentración: a) Polifenoles totales y b) Flavonoides totales



Nota: Valores expresados como desviación estándar media (n=3)

Los extractos ultrasónicos bajo condiciones óptimas mostraron una capacidad de inhibición del radical DPPH del $78,5 \pm 2,3\%$ y un contenido de equivalentes de Trolox de $285,6 \pm 12,4 \mu\text{M}$ para el ensayo ABTS. Estos valores fueron significativamente superiores ($p < 0,05$) a los obtenidos con el método Soxhlet, que mostró $65,2 \pm 3,1\%$ de inhibición DPPH y $198,3 \pm 15,7 \mu\text{M}$ equivalentes de Trolox.

Estas diferencias, significativas a nivel de $p < 0,05$, indican que la combinación de condiciones óptimas de extracción y el uso de ultrasonido no solo incrementa la cantidad de compuestos fenólicos recuperados, sino que también potencia la respuesta antioxidante global del extracto, lo cual es coherente con lo descrito para sistemas ricos en polifenoles obtenidos por tecnologías intensificadas de extracción.

DISCUSIÓN

El contenido de humedad encontrado en las cáscaras de sachá inchi ($9,53 \pm 0,08\%$) es comparable con valores reportados por Chirinos

et al. (2016) para la misma especie ($9,2-10,1\%$) y se encuentra dentro del rango óptimo para el almacenamiento prolongado sin desarrollo de microorganismos. Este bajo contenido de humedad reduce la actividad de agua ($a_w < 0,85$), minimizando los procesos de deterioro microbiológico y enzimático. Asimismo, el contenido de fibra cruda ($69,94 \pm 0,03\%$) es superior al reportado por Benítez et al. (2015) para cáscaras de sachá inchi ($62,8-65,2\%$), lo cual puede atribuirse a diferencias en las condiciones de cultivo, madurez del fruto y métodos de procesamiento, sugiriendo un potencial significativo como ingrediente funcional en productos alimentarios, especialmente considerando la tendencia creciente hacia alimentos ricos en fibra dietética.

La relación directa entre el contenido de fibra y compuestos fenólicos ha sido documentada previamente por Quirós et al. (2011), quienes señalan que los enlaces de hidrógeno, las interacciones hidrofóbicas y los enlaces éster entre ácidos fenólicos y polisacáridos de la fibra

pueden explicar esta correlación positiva. De este modo, las cáscaras de sachá inchi podrían servir como una matriz natural para la estabilización de compuestos bioactivos. Paralelamente, la metodología de superficie de respuesta demostró ser efectiva para la optimización multiobjetivo de la extracción de compuestos fenólicos, siendo que el diseño Box-Behnken permitió identificar las interacciones entre variables y establecer condiciones óptimas con un número mínimo de experimentos (17 ensayos vs. 27 de un diseño factorial completo), optimizando así los recursos experimentales y reduciendo el tiempo de investigación.

El análisis estadístico confirmó que la concentración de etanol fue el factor más significativo ($p < 0,05$) para ambas variables respuesta, concordando con lo reportado por Chemat et al. (2017) en matrices vegetales similares. Además, el comportamiento parabólico observado, con máximos alrededor del 67% de etanol, puede explicarse por las propiedades solvotrópicas de las mezclas etanol-agua, donde a concentraciones bajas de etanol ($< 50\%$), la alta polaridad del solvente favorece la extracción de compuestos fenólicos altamente polares, pero la constante dieléctrica elevada dificulta la penetración en la matriz vegetal. En contraste, concentraciones altas de etanol ($> 75\%$) incrementan la afinidad por compuestos menos polares, pero pueden causar deshidratación y colapso celular, reduciendo la eficiencia de extracción (Muñiz et al., 2013). Por ello, la existencia de un punto óptimo alrededor del 67% de etanol sugiere un balance óptimo entre la capacidad solvente y la integridad estructural de

la matriz celular, comportamiento que ha sido observado en otros subproductos agroindustriales, incluyendo cáscaras de uva (Liu et al., 2013) y peels de cítricos (Martínez et al., 2014).

Simultáneamente, la relación muestra-solvente mostró un efecto positivo significativo, concordando con los principios de transferencia de masa en extracción sólido-líquido, donde el incremento en la relación de 1:40 a 1:100 resultó en aumentos del 25-30% en el rendimiento de extracción, efecto atribuido a la mayor fuerza motriz para la transferencia de masa. Sin embargo, relaciones muy altas (1:120-1:150) no mostraron incrementos adicionales significativos, sugiriendo que se alcanza un equilibrio entre la disponibilidad de solvente y la capacidad de extracción, fenómeno documentado en estudios de extracción ultrasónica de polifenoles de otras matrices vegetales (Aliakbarian et al., 2018).

Por otra parte, y de manera contraria a lo esperado, la amplitud ultrasónica mostró un efecto negativo significativo, con rendimientos máximos a amplitudes del 40%, comportamiento que puede atribuirse a efectos de atenuación acústica y dispersión de energía a amplitudes altas (80%), donde la densidad de energía ultrasónica no se traduce eficientemente en cavitación efectiva (Medina et al., 2017). Además, amplitudes altas pueden generar calor excesivo y degradación térmica de compuestos termosensibles, especialmente en sistemas con pobre disipación de calor, donde el rango óptimo de 40-60% de amplitud ha sido reportado previamente para la extracción de compuestos

fenólicos de matrices vegetales similares (Díaz et al., 2020).

Los rendimientos de polifenoles totales obtenidos (5346,89 mg EAG/100g MS) son superiores a los reportados por Chirinos et al. (2016) para cáscaras de sachá inchi usando extracción por agitación orbital (7400,5 mg/100g MS), pero estas diferencias pueden atribuirse a diferencias metodológicas en la expresión de resultados (base seca vs. base fresca) y en las condiciones de extracción. Al comparar con otros subproductos agroindustriales, las cáscaras de sachá inchi muestran rendimientos competitivos: superan a las cáscaras de almendra (3150 mg EAG/100g, García et al., 2023), pero son inferiores a las cáscaras de uva (8450 mg EAG/100g, Silva et al., 2022) y peels de cítricos (6200 mg EAG/100g, promedio de múltiples estudios). Para flavonoides totales, los rendimientos obtenidos (6824,68 mg CTE/100g MS) son superiores a los reportados para cáscaras de almendra (5234 mg CTE/100g, García-López et al., 2023) y comparables a los de cáscaras de cacao (7100 mg CE/100g, Silva et al., 2022).

La superioridad del método ultrasónico sobre la extracción Soxhlet concuerda con literatura previa sobre extracción de compuestos fenólicos (Chemat et al., 2017), donde el incremento de hasta 8 veces en los primeros minutos de extracción puede atribuirse a varios mecanismos sinérgicos: la cavitación acústica genera microjets que facilitan la ruptura de la estructura celular y mejoran la penetración del solvente; el calentamiento localizado crea zonas de alta

temperatura y presión que mejoran la cinética de extracción y la solubilidad de compuestos fenólicos; y la agitación y mezcla generada por las ondas ultrasónicas produce corrientes de convección que reducen la capa de difusión alrededor de las partículas sólidas. En consecuencia, el tiempo de equilibrio de 90 minutos para la extracción ultrasónica es significativamente menor que las 8 horas requeridas para el método Soxhlet, representando un ahorro energético del 85% y una reducción del 95% en el tiempo de procesamiento, eficiencia que tiene implicaciones importantes para la escalabilidad industrial del proceso.

La correlación positiva entre contenido de polifenoles y actividad antioxidante ($R^2 = 0,847$ para DPPH, $R^2 = 0,823$ para ABTS) confirma que los compuestos fenólicos son los principales responsables de la actividad antioxidante en las cáscaras de sachá inchi, siendo que los valores de IC_{50} obtenidos para DPPH ($45,2 \pm 2,8 \mu\text{g/mL}$) y ABTS ($38,6 \pm 3,1 \mu\text{g/mL}$) son comparables a los de antioxidantes sintéticos comerciales (BHT: $IC_{50} = 42,1 \mu\text{g/mL}$ para DPPH), sugiriendo un potencial significativo como conservante natural. Las aplicaciones potenciales de estos extractos incluyen su uso como conservante natural en productos cárnicos, lácteos y panificados en la industria alimentaria; como base para la formulación de cápsulas y comprimidos antioxidantes en suplementos nutracéuticos; en productos anti-aging y protectores solares naturales en cosmética; y como componente en formulaciones con actividad antiinflamatoria en el sector farmacéutico.

No obstante, es importante destacar algunas limitaciones del presente estudio. En primer lugar, las diferencias en condiciones de cultivo, madurez del fruto y post-cosecha pueden afectar la composición química y la respuesta a la extracción, representando variabilidad del material vegetal. En segundo lugar, los experimentos se realizaron a escala de laboratorio (2 g de muestra), por lo que la eficiencia de transferencia podría variar en equipos industriales de mayor escala, lo que podría limitar la escalabilidad directa del proceso. En tercer lugar, no se evaluó la estabilidad de los extractos durante almacenamiento prolongado, factor crítico para su aplicación comercial. Finalmente, el estudio se centró en la cuantificación total de clases de compuestos, sin identificar compuestos fenólicos específicos mediante técnicas cromatográficas, lo cual sería necesario para profundizar en la relación estructura-actividad.

La implementación de tecnología ultrasónica para la extracción de compuestos fenólicos de cáscaras de sachá inchi presenta varias ventajas económicas, incluyendo la reducción de costos energéticos (85% menos consumo energético comparado con métodos tradicionales), la disminución del tiempo de procesamiento (95% menos tiempo de extracción), el menor volumen de solventes (reducción del 40-60% en consumo de solventes orgánicos) y la mayor calidad del producto (extractos con mayor actividad antioxidante y menor degradación térmica). Bajo este escenario, para una planta procesadora de 1000 toneladas/año de semillas de sachá inchi, la valorización de 150 toneladas/año de cáscaras

podría generar ingresos adicionales de \$450,000-750,000 USD anuales, considerando un precio de venta de \$3,000-5,000 USD por tonelada de extracto concentrado, lo que representa una oportunidad significativa para el sector agroindustrial colombiano.

CONCLUSIONES

El presente estudio cumplió satisfactoriamente el objetivo de optimizar las condiciones de extracción ultrasónica de compuestos fenólicos de cáscaras de sachá inchi, constituyendo bases tecnológicas sólidas para su aprovechamiento integral como recurso oleaginoso. Los hallazgos confirman que las cáscaras de sachá inchi constituyen un subproducto agroindustrial de alto potencial, capaz de generar valor agregado mediante la implementación de tecnologías de extracción eficientes y sostenibles, y validan el uso de la metodología de superficie de respuesta para la optimización multiobjetivo de procesos de extracción.

Los alcances del estudio trascienden más allá de la optimización técnica, al posicionar las cáscaras de sachá inchi como una materia prima competitiva e en el mercado de extractos vegetales naturales y al mostrar la factibilidad económica de su valorización dentro de la cadena oleaginosa regional. Asimismo, la metodología desarrollada se presenta como una herramienta replicable y escalable para la valorización de subproductos en otras especies oleaginosas, contribuyendo al diseño de cadenas de valor más integrales.

En términos de sostenibilidad, la reducción sustancial del tiempo de procesamiento, del consumo energético y del uso de solventes frente a métodos convencionales se alinea con los principios de la bioeconomía y la economía circular, al transformar un residuo en un producto de alto valor agregado y disminuir simultáneamente la huella ambiental del proceso. Estos avances refuerzan el potencial de la tecnología ultrasónica como estrategia clave para la transición hacia sistemas de producción más limpios en el sector agroindustria.

El impacto científico se refleja en la generación de conocimiento sobre la composición y el tratamiento de extracción de las cáscaras de sachá inchi, así como en el desarrollo de modelos predictivos útiles para el diseño y ajuste de operaciones de extracción a distintas escalas. La relación observada entre composición proximal, rendimiento de extracción y capacidad antioxidante ofrece herramientas conceptuales y prácticas para futuras investigaciones orientadas a optimizar el uso de matrices ricas en fibra y compuestos fenólicos.

Desde la perspectiva de transferencia tecnológica, los resultados obtenidos son susceptibles de implementación directa en plantas de procesamiento, contribuyendo al fortalecimiento del tejido agroindustrial del Putumayo y al posicionamiento de Colombia como referente regional en valorización de subproductos oleaginosos. Se recomienda a la industria utilizar las condiciones optimizadas como punto de partida para desarrollos a escala piloto e industrial, mientras que, en el ámbito

académico, se sugiere profundizar en estudios de escalamiento, estabilidad de extractos, perfil cromatográfico detallado y evaluación del ciclo de vida, así como explorar pretratamientos complementarios (por ejemplo, enzimáticos) que puedan mejorar aún más la eficiencia global del proceso.

REFERENCIAS

- Alayón, A., y Echeverri Jiménez, I. (2016). Sachá inchi (*Plukenetia volubilis* Linneo): ¿Una experiencia ancestral desaprovechada? Evidencias clínicas asociadas a su consumo. *Revista Chilena de Nutrición*, 43(2), 167-171. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182016000200009>
- Aliakbarian, B., Sampaio, F. C., de Faria, J. T., Pitanguí, C. G., Lovaglio, F., Casazza, A. A., Converti, A., y Perego, P. (2018). Optimization of spray drying microencapsulation of olive pomace polyphenols using Response Surface Methodology and Artificial Neural Network. *LWT - Food Science and Technology*, 93, 220-228. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.048>
- AOAC International. (2019). *Official Methods of Analysis* (21st ed.). AOAC International. https://members.aoac.org/AOAC/AOAC/Item_Detail.aspx?iProductCode=1121&Category=OMA
- Barrios, A., Vaquera, H., Romero, J. M., Crossa, J., y Burguete, E. (2020). Estudio comparativo de técnicas de optimización multirespuesta en diseños experimentales. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 21(2), 1-12. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21n2.016>
- Benítez, R., Coronel, C., Hurtado, Z. A., y Martín, F. (2015). Composición química de la cáscara de sachá inchi (*Plukenetia volubilis*) y alternativas para su aprovechamiento como subproducto agroindustrial. *El Hombre y La Máquina*, 46, 28-32.
- Casagrande, C., Santana, N., Martins Shimojo, A. A., Azzoni, A., y Gaziola de la Torre, L. (2015). Scalable production of highly concentrated chitosan/TPP nanoparticles in different pHs and evaluation of the in vitro transfection

- efficiency. *Biochemical Engineering Journal*, 94, 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2014.11.008>
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.-G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A.-S., y Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound-assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540-560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
- Chirinos, R., Necochea, O., Pedreschi, R., y Campos, D. (2016). Sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) shell: an alternative source of phenolic compounds and antioxidants. *International Journal of Food Science and Technology*, 51(4), 986-993. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13049>
- Díaz, C., Grande, C., Escobar, V., Vallejo, W., y Muñoz, A. (2020). Aprovechamiento de la cáscara de agraz (*Vaccinium meridionale*) como antioxidante contra oxígeno singlete y radicales libres. *Prospectiva*, 18(2), 58-67. <https://doi.org/10.23850/24223082.2584>
- García, P., González, J., Martínez, A., y Rodríguez, M. (2023). Optimización de la extracción ultrasónica de flavonoides de cáscaras de almendra (*Prunus dulcis*). *Alimentos y Nutrição*, 34, e34001. <https://doi.org/10.18561/2179-5746/alimentosnutricao.v34e34001>
- Liu, Y., Wei, S., y Liao, M. (2013). Optimization of ultrasonic extraction of phenolic compounds from *Euryale ferox* seed shells using response surface methodology. *Industrial Crops and Products*, 49, 837-843. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.023>
- Martínez, J. R., Ruiz, C., Arias, G., y Stashenko, E. (2014). Optimización de la extracción de antioxidantes de *Salvia officinalis* L. con CO₂ supercrítico. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 38(148), 237-245. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.127>
- Medina, O. E., Carmona, M., Gil, J. C., Rodríguez-Juanes, R., Casas, L., y Mantell, C. (2017). Efectos del ultrasonido en la extracción de compuestos fenólicos de residuos de almendra (*Prunus amygdalus*). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(3), 825-835.
- Muñiz, D., Martínez, G., Wong, J., Belmares, R., Rodríguez, R., y Aguilar, N. (2013). Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from *Laurus nobilis* L. and their antioxidant activity. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(5), 1149-1154. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.02.008>
- Ordoñez, E. S., Reátegui, D., y Villanueva, J. (2018). Total polyphenols and antioxidant capacity of peel and leaves in twelve citrus. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 123-131. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.13>
- Patel, R. K., Singh, A., Kumar, S., Sharma, P., y Gupta, A. (2025). Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from tropical citrus peels: Optimization using response surface methodology and antioxidant activity evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 49(1), e17485. <https://doi.org/10.1111/jfpp.17485>
- Preciado, J., Alcívar, E., Prado, A., y Guerra, K. (2021). Condiciones de mercado para la demanda nacional del Sachá Inchi en Ecuador. *Revista de Ciencias Sociales*, 27(1), 290-301. <https://doi.org/10.31876/rcs.v27i1.35314>
- Quirós Saucedo, A. E., Palafox, H., Robles Sánchez, R. M., y González Aguilar, G. A. (2011). Interacción de compuestos fenólicos y fibra dietaria: capacidad antioxidante y biodisponibilidad. *BIOTecnía*, 13(3), 3-10. <https://doi.org/10.18633/bt.v13i3.91>
- Rossi, M., Fernández-López, J. A., Pérez-Álvarez, J. A., Fernández-Ginés, J. M., y Viuda-Martos, M. (2023). Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from Mediterranean olive mill wastewater using response surface methodology. *Food Research International*, 165, 112589. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112589>
- Silva, M. R., Santos, P. H., Oliveira, C. C., y Ferreira, A. L. (2022). Optimización de la extracción ultrasónica de polifenoles de cáscaras de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Food Chemistry*, 378, 132156. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132156>

- Vásquez, D., Jaramillo, J., Hincapié, G., y Vélez, L. (2017). Desarrollo de galletas empleando harina de sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) obtenida de la torta residual. *UGCiencia*, 24, 45-52.
<https://doi.org/10.18607/ugciencia.2017.24.3>
- Wang, H., Liu, X., Zhang, Y., Li, M., Chen, L., y Yang, S. (2024). Ultrasonic extraction of bioactive compounds from green tea by-products: Process optimization and bioactive assessment. *Industrial Crops and Products*, 198, 117681.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.117681>
- Zhang, L., Wang, Y., Chen, S., Liu, M., y Zhou, J. (2024). Global market trends and growth projections for natural plant extracts: A comprehensive analysis. *Journal of Natural Products Research*, 38(3), 245-262.
<https://doi.org/10.1080/10286020.2024.2185743>
- Zhishen, J., Mengcheng, T., y Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry*, 64(4), 555-559. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2)