

Solid–solvent ratio in the ultrasound-assisted extraction of total saponins from quinoa husk (*Chenopodium quinoa Willd.*)

Obregon-Tinoco, Henry Mg¹, Cárdenas-Toro, Fiorella, PhD²

¹Programa de Doctorado en Ingeniería, Sección de Ingeniería Industrial, Departamento Académico de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 15088, Perú.

²Grupo de Innovación en Desarrollo de Nuevos Productos, Programa de Ingeniería Química, Sección de Ingeniería Industrial, Departamento Académico de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 15088, Perú.

hobregon@pucp.edu.pe, fcardenas@pucp.pe

Abstract– This study evaluated the effect of the solid-to-solvent ratio on the ultrasound-assisted extraction of total saponins from quinoa husk (*Chenopodium quinoa Willd.*), with the aim of identifying an efficient operating range for further optimization studies. Saponin quantification was performed using the vanillin-sulfuric acid spectrophotometric method, employing commercial saponin from *Quillaja saponaria* as a standard. Calibration curves with high linearity ($R^2 > 0.996$) and adequate reproducibility were obtained. Screening assays were carried out under fixed extraction conditions (40% v/v ethanol, 60 °C, 50% ultrasonic amplitude, and a 30 s ON–30 s OFF pulse cycle), evaluating five solid-to-solvent ratio levels (0.01–0.10 g CQ/mL Sol.). The results showed a significant increase in the total saponin content of the extract with increasing solid-to-solvent ratio, reaching concentrations of up to

20.27 mg total saponins/mL of extract. A reduction in the progressive increase in yield was observed at treatments above 0.075 g CQ/mL Sol., attributed to physical limitations of the system. Based on these results, an optimal operating range was established between 0.050 and 0.100 g CQ/mL Sol, which provides a technical basis for the subsequent application of a Box-Behnken design for multivariable process optimization. This study contributes relevant experimental criteria for the sustainable valorization of quinoa husk using ultrasound-assisted extraction technologies.

Keywords: Quinoa husk, total saponins, ultrasound-assisted extraction, solid-to-solvent ratio, process optimization

Relación sólido–solvente en la extracción ultrasónica de saponinas totales de cascarilla de quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*)

Obregon-Tinoco, Henry Mg¹, Cárdenas-Toro, Fiorella, PhD²

¹Programa de Doctorado en Ingeniería, Sección de Ingeniería Industrial, Departamento Académico de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 15088, Perú.

²Grupo de Innovación en Desarrollo de Nuevos Productos, Programa de Ingeniería Química, Sección de Ingeniería Industrial, Departamento Académico de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 15088, Perú.

hobregon@pucp.edu.pe, fcardenas@pucp.pe

Resumen— *El presente estudio evaluó el efecto de la relación sólido–solvente en la extracción asistida por ultrasonido de saponinas totales a partir de cascarilla de quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*), con el objetivo de identificar un rango operativo eficiente para estudios posteriores de optimización. La cuantificación de saponinas se realizó mediante el método espectrofotométrico vainillina–ácido sulfúrico, empleando saponina comercial de Quillaja saponaria como estándar, obteniéndose curvas de calibración con alta linealidad ($R^2 > 0.996$) y adecuada reproducibilidad. Los ensayos de screening se llevaron a cabo bajo condiciones fijas de extracción (40 % v/v etanol, 60 °C, 50 % de amplitud ultrasónica y ciclo de pulso 30 s ON–30 s OFF), evaluándose cinco niveles de relación sólido–solvente (0.01–0.1 g de cascarilla de Quinua(CQ)/mL solución). Los resultados mostraron un incremento significativo del contenido de saponinas totales en el extracto al aumentar la relación sólido–solvente, alcanzándose concentraciones de hasta 20.27 mg saponinas totales/mL de extracto. Se observó una reducción en el aumento progresivo del rendimiento a tratamientos superiores a 0.075 g CQ/mL Sol, atribuida a limitaciones físicas del sistema. Con base en estos resultados, se estableció un intervalo operativo óptimo entre 0.050 y 0.100 g CQ/mL Sol, el cual constituye una base técnica para la aplicación posterior de un diseño Box–Behnken orientado a la optimización multivariable del proceso. El estudio aporta criterios experimentales relevantes para la valorización sostenible de la cascarilla de quinua mediante tecnologías de extracción asistidas por ultrasonido*

Palabras Clave: Cascarilla de quinua, saponinas totales, extracción asistida por ultrasonido, relación sólido–solvente, optimización de procesos.

I. INTRODUCCIÓN

La quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) es un cultivo de alto valor nutricional cuyo procesamiento industrial genera subproductos como la cascarilla, rica en saponinas triterpénicas [1], [2]. Estos compuestos presentan propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas e

hipolipemiantes, lo que ha incrementado su interés en aplicaciones alimentarias, farmacéuticas y cosméticas [3]–[5]. En particular, estudios recientes destacan que la cascarilla concentra una proporción significativa de estas moléculas bioactivas, convirtiéndose en una fuente estratégica para su valorización [6], [7].

Desde una perspectiva tecnológica e industrial, la valorización de la cascarilla de quinua representa una oportunidad para transformar un residuo agroindustrial subutilizado en una fuente de compuestos de alto valor agregado. En países productores como Perú, el procesamiento de quinua genera volúmenes importantes de cascarilla, cuya gestión inadecuada puede generar impactos ambientales. En este contexto, el desarrollo de procesos eficientes para la recuperación de saponinas contribuye no solo a la generación de valor económico, sino también a la sostenibilidad de la cadena productiva.

La extracción asistida por ultrasonido se ha consolidado como una tecnología eficiente y sostenible para la recuperación de metabolitos secundarios, debido a su capacidad para mejorar la transferencia de masa mediante cavitación acústica [8], [9]. Investigaciones previas han demostrado que esta técnica permite incrementar el rendimiento de extracción y reducir el consumo de solventes frente a métodos convencionales [10], [11].

Entre los parámetros operativos del proceso, la relación sólido–solvente desempeña un papel determinante, al influir directamente en la difusión del soluto, la saturación del medio y la eficiencia de cavitación [12], [13]. Aunque diversos estudios han optimizado procesos de extracción de saponinas en semillas y tejidos vegetales, existe aún información limitada sobre la evaluación sistemática de este parámetro en la cascarilla de quinua [6], [14]. Desde una perspectiva de ingeniería de procesos, la adecuada selección de esta variable es clave para el escalamiento del proceso y la evaluación de su viabilidad técnico-económica.

Asimismo, la cuantificación confiable de saponinas totales constituye un requisito esencial para evaluar el desempeño extractivo. El método colorimétrico vainillina–ácido sulfúrico

ha sido ampliamente validado por su sensibilidad y reproducibilidad en matrices de quinua [15], [16].

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de la relación sólido-solvente en la extracción asistida por ultrasonido de saponinas totales a partir de cascarilla de quinua y establecer un rango operativo óptimo como base para estudios posteriores de optimización mediante diseño Box–Behnken. Asimismo, los resultados obtenidos aportan criterios técnicos relevantes para el diseño de procesos sostenibles con potencial aplicación industrial en la valorización de subproductos agroindustriales.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materia prima y preparación de la muestra

La materia prima utilizada correspondió a granos de quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) variedad blanca Junin-Inia Lote: AYA-15-23 proveniente de la Región Ayacucho, Perú. La obtención de la cascarilla se realizó mediante escarificado mecánico empleando una escarificadora VULCANO modelo EQV-200 (Perú). Previamente, se efectuaron ensayos preliminares para establecer las condiciones óptimas de operación, considerando criterios de eficiencia, estabilidad y rendimiento del proceso. El procedimiento estandarizado fue ejecutado en triplicado (R1, R2 y R3), manteniendo constantes los parámetros operativos. En la Fig. 1 se muestra el proceso de escarificado mecánico de quinua.



Fig. 1 Proceso de Escarificado de Quinua

La cascarilla obtenida fue recolectada, envasada al vacío en bolsas trilaminadas y almacenada en condiciones de congelación, con el fin de preservar su estabilidad fisicoquímica y evitar la degradación de los compuestos bioactivos. Antes de los ensayos de extracción, las muestras fueron descongeladas a temperatura ambiente y homogenizadas, sin aplicar tratamientos térmicos previos.

B. Reactivos, materiales y Equipos

Para el desarrollo experimental se empleó extracto comercial de saponina de Quillaja saponaria con una pureza declarada del 28 % (Merck) como estándar de referencia. El etanol (96 %) y el ácido sulfúrico (95.9 %) fueron de grado

analítico. La vainillina (CAS 121-33-5) fue utilizada con pureza ≥ 99 %, y se empleó agua destilada en la preparación de todas las soluciones.

Entre los principales materiales de laboratorio se incluyeron matraces aforados, pipetas volumétricas, micropipetas digitales (0.5–5 mL), tubos con tapa rosca, gradillas, vasos de precipitados y celdas espectrofotométricas de 1 cm de paso óptico.

Los equipos utilizados comprendieron una escarificadora VULCANO modelo EQV-200 (Perú), una balanza analítica Precisa Serie LX (± 0.0001 g), una balanza gramera AND GF-6100 (Japón), un espectrofotómetro UV–Vis GENESYS 150 (Thermo Scientific), un homogeneizador ultrasónico para procesamiento líquido modelo YR05830, acoplado a un baño termostático criogénico modelo YR04986 para el control de temperatura durante la sonicación, una selladora al vacío BOXA SV3 (Perú) y un sistema de congelación para el almacenamiento de muestras.

C. Preparación de Solución estándar y Curva de calibración

Las soluciones patrón de saponina fueron preparadas a partir de extracto comercial de *Quillaja saponaria* con una pureza declarada del 28 %, corrigiendo la masa pesada según dicho valor. Se prepararon cinco niveles de concentración: 0.5, 2, 5, 8 y 10 27 mg saponinas totales/mL de extracto, presentados en la Fig. 2. Para cada concentración, las soluciones fueron elaboradas por triplicado con el fin de evaluar la precisión y reproducibilidad del procedimiento.

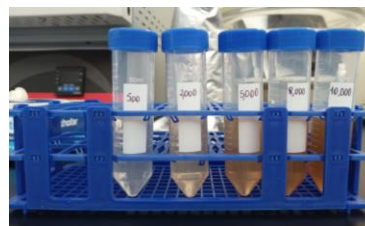


Fig. 2 Estándares de Saponina

Inicialmente, la masa correspondiente del extracto patrón fue pesada en una balanza analítica y transferida a los matraces aforados de 25mL. Posteriormente, se adicionaron aproximadamente 12.5 mL de etanol para favorecer la solubilización inicial del extracto. Tras obtener soluciones homogéneas, el volumen fue completado con agua destilada hasta el enrase. Posteriormente, se tomaron alícuotas de 0.5 mL de cada solución estándar, a las cuales se añadieron 0.5 mL de solución de vainillina al 4 % (p/v) y 2.0 mL de solución de ácido sulfúrico al 50 % (p/v). Las mezclas reactivas fueron incubadas a 65 °C durante 15 min para permitir el desarrollo del color característico, y posteriormente enfriadas en baño de hielo durante 5 min. La absorbancia de cada muestra fue medida a una longitud de onda de 473 nm utilizando celdas de 1 cm., presentado en la Fig. 3.



Fig. 3 Medición espectrofotométrica de estándares para curva de calibración

Las curvas de calibración fueron construidas en dos escenarios analíticos independientes, a partir del promedio de tres mediciones por nivel, evaluándose su linealidad mediante regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2). Las ecuaciones obtenidas fueron utilizadas para la cuantificación de saponinas totales en los extractos.

D. Extracción Asistida por Ultrasonido

Los ensayos de extracción se realizaron empleando un homogeneizador ultrasónico modelo YR05830, acoplado a un baño termostático criogénico modelo YR04986 presentado en la Fig. 4, con el fin de garantizar el control de la temperatura durante el proceso. El sistema fue operado bajo condiciones constantes previamente establecidas.



Fig. 4 Equipo de extracción asistida por ultrasonido

Para cada ensayo, se pesó una cantidad definida de cascarilla de quinua y se colocó en tubos con tapa rosca, adicionando una solución hidroalcohólica de etanol al 40 % (v/v) como solvente extractante. El volumen de solvente fue mantenido constante para todos los tratamientos, variando únicamente la masa de muestra según la relación sólido-solvente evaluada. Las condiciones operativas del proceso se fijaron en una amplitud de ultrasonido del 50 %, con un ciclo de pulso de 30 s ON – 30 s OFF y una temperatura controlada de 60 °C. La sonicación se realizó durante un tiempo total constante para todos los experimentos. Durante la extracción, las muestras fueron sometidas a agitación ultrasónica directa con la finalidad de realizar la transferencia de saponinas de la cascarilla hacia el solvente (Fig. 5). Al finalizar el tratamiento, los extractos fueron enfriados y filtrados para su posterior análisis espectrofotométrico.

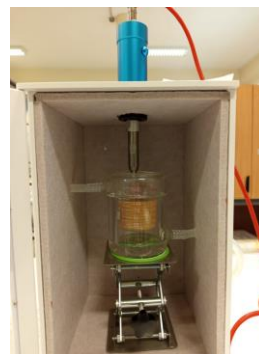


Fig. 5. Proceso de Extracción asistida por ultrasonido

E. Ensayos de Screening de la Relación Sólido-Solvente

Previo a la etapa de optimización multivariable, se realizaron ensayos preliminares de *screening* con el objetivo de evaluar el efecto de la relación sólido-solvente sobre el rendimiento de extracción de saponinas totales y definir un intervalo operativo adecuado para estudios posteriores.

La relación sólido-solvente expresado en g cascarilla de quinua/mL solución (g CQ/mL Sol.), consiste en modificar la masa de cascarilla de quinua y manteniendo constante el volumen de solvente. Se estudiaron cinco niveles: 0.01, 0.02, 0.05, 0.075 y 0.10 g CQ/mL Sol. Cada tratamiento fue realizado por triplicado para asegurar la reproducibilidad de los resultados. Una vez finalizada la extracción, los extractos obtenidos fueron sometidos a análisis espectrofotométrico mediante el método vainillina-ácido sulfúrico, y la concentración de saponinas totales fue determinada a partir de la curva de calibración previamente validada. Los resultados fueron expresados como mg de saponinas por mL de extracto (mg ST/mL Ext.) y analizados estadísticamente para evaluar la tendencia y significancia del efecto de la relación sólido-solvente.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Validación del Método Espectrofotométrico para Saponinas Totales

La cuantificación de saponinas totales mediante el método espectrofotométrico vainillina-ácido sulfúrico presentó una relación lineal adecuada entre absorbancia y concentración en el rango de 0.5–10 mg ST/mL Ext., con coeficientes de determinación superiores a 0.996. Estos resultados son consistentes con lo reportado para matrices de quinua y otros materiales vegetales, donde se ha documentado una elevada sensibilidad y reproducibilidad del método cuando se emplea saponina de *Quillaja saponaria* como estándar [2], [6], [15].

La curva de calibración obtenida mostró una pendiente estable y baja dispersión entre réplicas, evidenciando una adecuada sensibilidad analítica y una respuesta espectrofotométrica proporcional a la concentración de saponinas. La estabilidad del método vainillina-ácido sulfúrico depende del control térmico, la homogenización de la muestra y la cinética de desarrollo del color, factores que

fueron mantenidos constantes durante el análisis, en concordancia con recomendaciones metodológicas reportadas en la literatura [3], [6].

En la Fig. 6 se muestra las curvas de calibración obtenidas para ambos escenarios analíticos, evidenciando la adecuada proporcionalidad entre absorbancia y concentración.

Estos resultados confirman la confiabilidad del método analítico aplicado, en concordancia con estudios previos que reportan el uso del sistema vainillina-ácido sulfúrico como una herramienta robusta para la evaluación comparativa de procesos extractivos de saponinas en matrices de quinua [2], [3], [6].

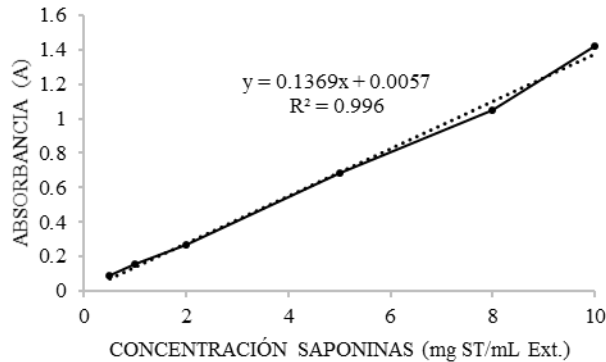


Fig. 6. Curvas de calibración obtenidas en los dos escenarios analíticos.

B. Efecto de la Relación Sólido-Solvente en la Extracción de Saponinas

En la Tabla I se presentan los resultados obtenidos de las lecturas de medición espectrofotométrica para cada uno de los escenarios de Relación Sólido-Solvente realizados por triplicado. Mientras que en la Tabla II, se presentan los resultados de concentración de Saponinas Totales obtenidos a partir de los resultados de la Tabla I y la Curva de Calibración presentada en la Figura 6. En la Figura 7, se muestra una representación gráfica de los resultados de la Tabla II.

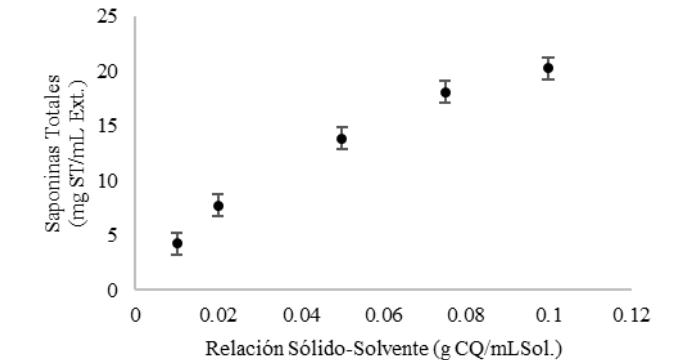
TABLA I. LECTURAS DE ABSORBANCIA DE LA RELACIÓN SÓLIDO-SOLVENTE					
Relación (g CQ/mL Sol.)	M1	M2	M3	Promedio (A)	SD (A)
0.010	0.674	0.554	0.525	0.58433	0.07896
0.020	1.149	0.979	1.052	1.06000	0.08528
0.050	1.954	1.962	1.792	1.90267	0.09593
0.075	2.601	2.425	2.413	2.48033	0.10470
0.100	2.758	2.758	2.822	2.77933	0.03635

Los ensayos de *screening* evidenciaron un efecto positivo y estadísticamente significativo de la relación sólido-solvente sobre el contenido de saponinas totales extraídas. El ANOVA de una vía mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos ($F = 369.42$; $p < 0.001$), y la prueba de Tukey

confirmó diferencias significativas entre todos los niveles evaluados ($p < 0.05$). Al incrementar la relación de 0.01 a 0.10 g CQ/mL Sol., la concentración de saponinas totales aumentó de 4.23 a 20.27 mg ST/mL Ext., indicando una mejora en la transferencia de masa y una mayor disponibilidad de soluto en el sistema sólido-líquido, en concordancia con estudios previos de extracción asistida por ultrasonido [11], [13].

TABLA II
LECTURAS DEL CONTENIDO DE SAPONINAS TOTALES DE LA RELACIÓN SÓLIDO-SOLVENTE

Relación (g CQ/mL Sol.)	Saponinas Totales (mg ST/mL Ext.)	SD (A)	SD Saponinas Totales (mg ST/mL Ext.)
0.010	4.23	0.07896	0.58
0.020	7.70	0.08528	0.62
0.050	13.85	0.09593	0.70
0.075	18.08	0.10470	0.76



0.100	20.27	0.03635	0.27
-------	-------	---------	------

TABLA III
ANOVA Y PRUEBA DE TUKEY PARA EL CONTENIDO DE SAPONINAS TOTALES SEGÚN LA RELACIÓN SÓLIDO-SOLVENTE

Relación (g CQ/mL Sol.)	Saponinas Totales (mg ST/mL Ext.)	Grupo Tukey
0.010	4.23 ± 0.58	a
0.020	7.70 ± 0.62	b
0.050	13.85 ± 0.70	c
0.075	18.08 ± 0.76	d
0.100	20.27 ± 0.27	e

ANOVA: $F = 369.42$; $p < 0.001$
Tukey HSD ($\alpha = 0.05$): letras diferentes indican diferencias significativas

En la Tabla III se muestran los resultados del análisis estadístico ANOVA y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para el contenido de saponinas totales en función de la relación sólido-solvente. Los grupos estadísticos identificados mediante letras (a-e) evidencian diferencias

significativas entre todos los niveles evaluados ($p < 0.05$), confirmando que el incremento progresivo de la relación sólido–solvente genera cambios reales y consistentes en la eficiencia extractiva del sistema.

En el intervalo de 0.01 a 0.05 g CQ/mL Sol., el incremento fue casi proporcional, sugiriendo condiciones favorables de cavitación ultrasónica y adecuada dispersión del sólido [7], [9], [11]. Sin embargo, a partir de 0.075 g CQ/mL Sol., se observó una reducción en el aumento progresivo del rendimiento, lo que podría asociarse a efectos de saturación parcial del solvente, aumento de viscosidad y reducción de la intensidad de cavitación a altas cargas sólidas [8], [12], [13]. Estos resultados evidencian un comportamiento no lineal del proceso y sugieren la proximidad a una zona de meseta extractiva, información relevante para la posterior optimización mediante RSM considerando la relación sólido–solvente como factor crítico.

C. Reproducibilidad y Comportamiento del Sistema Extractivo

Las desviaciones estándar obtenidas para las réplicas experimentales fueron bajas y consistentes en todos los niveles de relación sólido–solvente, lo que evidencia una alta reproducibilidad del proceso y una adecuada precisión analítica del método de cuantificación empleado. La baja variabilidad observada respalda la estabilidad del sistema extractivo y la robustez del método vainillina–ácido sulfúrico bajo condiciones experimentales controladas, en concordancia con reportes previos sobre cuantificación de saponinas en matrices de quinoa [6], [15].

Desde el punto de vista estadístico, el ANOVA mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos ($p < 0.001$), mientras que la prueba de Tukey confirmó que cada nivel de relación sólido–solvente presentó respuestas diferenciadas. Estos resultados evidencian que la variable estudiada no solo es crítica, sino también estable dentro del sistema, ya que pequeños cambios en la proporción sólido–solvente generan variaciones reproducibles en la eficiencia extractiva. En términos fisicoquímicos, esto sugiere que la transferencia de masa y la interacción sólido–líquido se mantienen bajo condiciones controladas de cavitación ultrasónica, evitando fluctuaciones experimentales asociadas a inestabilidad hidrodinámica [12], [16].

D. Implicancias para la Optimización del Proceso

Con base en los resultados obtenidos, se estableció un intervalo operativo comprendido entre 0.050 y 0.100 g CQ/mL Sol., como la región de mayor eficiencia extractiva. Este rango permite maximizar el contenido de saponinas totales sin incurrir en pérdidas significativas de eficiencia asociadas a limitaciones físicas del proceso de extracción, tales como saturación del solvente y disminución de la eficacia de cavitación ultrasónica [8], [10], [12].

La delimitación de este intervalo resulta fundamental para la aplicación posterior de un diseño Box–Behnken, ya que

permite concentrar la optimización multivariable en una región experimental técnicamente favorable y coherente con estudios previos de optimización de extracción de saponinas a partir de matrices vegetales [16].

IV. CONCLUSIONES

La relación sólido–solvente tuvo un efecto significativo en la extracción asistida por ultrasonido de saponinas totales a partir de cascarilla de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). El método espectrofotométrico vainillina–ácido sulfúrico mostró adecuada linealidad y reproducibilidad para la cuantificación de saponinas totales.

El incremento de la relación sólido–solvente aumentó el rendimiento de extracción; sin embargo, a valores superiores a 0.075 g CQ/mL Sol., se evidenció una reducción en el aumento progresivo del rendimiento, atribuida a limitaciones físicas del sistema. Con base en los ensayos de *screening*, se estableció un intervalo operativo óptimo entre 0.050 y 0.100 g CQ/mL Sol., el cual constituye un punto de partida para estudios posteriores de optimización mediante diseño Box–Behnken.

IV. AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo financiero del Programa Nacional de Investigación Científica y de Estudios Avanzados (PROCIENCIA) del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) a través del proyecto con contrato PE501086616-2024-PROCIENCIA. Asimismo, se agradece al Laboratorio de Procesos Industriales de la Pontificia Universidad Católica del Perú por el uso de sus instalaciones.

REFERENCES

- [1] Graf, B. L., Rojo, L. E., Delatorre-Herrera, J., Poulev, A., Calfio, C., & Raskin, I. (2016). Phytoecdysteroids and flavonoid glycosides among Chilean and commercial sources of *Chenopodium quinoa*: variation and correlation to physico-chemical characteristics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(2), 633–643. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7134>
- [2] Kuljanabhagavad, T., & Wink, M. (2009). Biological activities and chemistry of saponins from *Chenopodium quinoa* Willd. *Phytochemistry Reviews*, 8(2), 473–490. <https://doi.org/10.1007/s11101-009-9121-0>
- [3] Navarro Del Hierro, J., Casado-Hidalgo, G., Reglero, G., & Martín, D. (2021). The hydrolysis of saponin-rich extracts from fenugreek and quinoa improves their pancreatic lipase inhibitory activity and hypocholesterolemic effect. *Food Chemistry*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128113>
- [4] Chen, J., Zhang, Y., Guan, X., Cao, H., Li, L., Yu, J., & Liu, H. (2022). Characterization of Saponins from Differently Colored Quinoa Cultivars and Their in Vitro Gastrointestinal Digestion and Fermentation Properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(6), 1810–1818. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c06200>
- [5] Cantero-Bahillo, E., Siles-Sánchez, M. D. L. N., Jaime, L., Martín, D., & Navarro del Hierro, J. (2024). Ultrasound-assisted Co-extraction and characterization of saponin-rich Co-extracts from fenugreek seeds (*Trigonella foenum-graecum* L.) and quinoa husk (*Chenopodium quinoa* Willd.) and their hydrolysates. *Food Bioscience*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105275>

- [6] Escribano, J., Cabanes, J., Jiménez-Atiénzar, M., Ibañez, M., Gómez Pando, L. R., García-Carmona, F. F., & Gandía-Herrero, F. (2017). Characterization of betalains, saponins and antioxidant power in differently colored quinoa (*Chenopodium quinoa*) varieties. *Food Chemistry*, 234, 285–294. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.187>
- [7] Sun, X., Yang, X., Xue, P., Zhang, Z., & Ren, G. (2019). Improved antibacterial effects of alkali-transformed saponin from quinoa husks against halitosis-related bacteria. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12906-019-2455-2>
- [8] Bai, H., Wu, Y., Liu, F., Xuan, D., Zhao, X., & Dong, W. (2025). Enhancing the washing of harvested quinoa seeds with ultrasound-assisted hydration. *Ultrasonics Sonochemistry*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107307>
- [9] Zhao, Y., Ma, Y., Li, J., Liu, B., Liu, X., Zhang, J., Zhang, M., Wang, C., Zhang, L., Lv, W., & Mu, G. (2022). Transcriptomics–metabolomics joint analysis: New highlight into the triterpenoid saponin biosynthesis in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.964558>
- [10] Manzoor, N., Yuan, J., Dongcheng, W., Liu, Z., Lin, C., & Mao, Z. (2025). Integrated transcriptomic and proteomic analyses revealed molecular mechanisms underlying nutritional changes during seed development of *Chenopodium quinoa*. *Genomics*, 117(3). <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2025.111045>
- [11] Su, R., Li, J., Hu, N., Wang, H., Cao, J., Chi, X., & Dong, Q. (2022). Screening for α -Glucosidase-Inhibiting Saponins from Pressurized Hot Water Extracts of Quinoa Husks. *Foods*, 11(19). <https://doi.org/10.3390/foods11193026>
- [12] Xue, P., Zhao, L., Wang, Y., Hou, Z., Zhang, F., & Yang, X. (2020). Reducing the damage of quinoa saponins on human gastric mucosal cells by a heating process. *Food Science and Nutrition*, 8(1), 500–510. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1332>
- [13] Gil-Ramirez, A., Salas-Veizaga, D. M., Grey, C., Karlsson, E. N., Rodriguez-Meizoso, I., & Linares-Pastén, J. A. (2018). Integrated process for sequential extraction of saponins, xylan and cellulose from quinoa stalks (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Industrial Crops and Products*, 121, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.074>
- [14] Letelier, M. E., Rodríguez-Rojas, C., Sánchez-Jofré, S., & Aracena-Parks, P. (2011). Surfactant and antioxidant properties of an extract from *Chenopodium quinoa* Willd seed coats. *Journal of Cereal Science*, 53(2), 239–243. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.12.006>
- [15] León-Roque, N., Aguilar-Tuesta, S., Quispe-Neyra, J., Mamani-Navarro, W., Alfaro-Cruz, S., & Condezo-Hoyos, L. (2019). A green analytical assay for the quantitation of the total saponins in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) based on macro lens-coupled smartphone. *Talanta*, 204, 576–585. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.06.014>
- [16] Han, Y., Chi, J., Zhang, M., Zhang, R., Fan, S., Dong, L., Huang, F., & Liu, L. (2019). Changes in saponins, phenolics and antioxidant activity of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd) during milling process. *LWT*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108381>