

Modelación matemática de la extracción sólido-líquido de polifenoles totales en *Hibiscus sabdariffa* L. Una aplicación del modelo de Page

Mathematical modeling of solid-liquid extraction of total polyphenols in *Hibiscus sabdariffa* L. An application of the Page model

Modelagem matemática da extração sólido-líquido de polifenóis totais em *Hibiscus sabdariffa* L. Uma aplicação do modelo de Page

Reyes-Mera, Jorge Julio
Universidad Estatal Amazónica
jreyes@uea.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6435-0649>



Viáfara-Banguera, Derwin
Universidad Estatal Amazónica
dviafara@uea.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1376-1231>



Luna-Fox, Sting Brayan
Universidad Estatal Amazónica
stingfox03@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6058-7024>



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/nE1/739>

Como citar:

Reyes-Mera, J. J., Viáfara-Banguera, D., & Luna-Fox, S. B. (2025). Modelación matemática de la extracción sólido-líquido de polifenoles totales en *Hibiscus sabdariffa* L. Una aplicación del modelo de Page. *Código Científico Revista De Investigación*, 6(E1), 1099–1115. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/nE1/739>.

Recibido: 20/02/2025

Aceptado: 11/03/2025

Publicado: 31/03/2025

Resumen

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la aplicabilidad de la ecuación de Page para modelar la cinética de extracción sólido-líquido de polifenoles totales a partir de cálices de *Hibiscus sabdariffa* L. Los extractos acuosos se obtuvieron con asistencia de ultrasonido, evaluando el efecto de tres temperaturas (30, 40 y 50 °C) y seis tiempos de extracción (10, 20, 30, 40, 50 y 60 minutos). La cuantificación de polifenoles totales se realizó empleando el método de Folin-Ciocalteu. La cinética fue modelada mediante el ajuste de los datos experimentales al modelo matemático de Page, cuya validez fue comprobada con el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson. Los resultados mostraron que el incremento en la temperatura y el tiempo tuvo un impacto positivo y significativo sobre la extracción de polifenoles, con concentraciones que oscilaron entre 0,16 y 0,69 g EAG/100 g de materia seca. Los datos se ajustaron con precisión al modelo de Page, respaldado por coeficientes de Pearson entre 0,996 y 0,999, destacando su idoneidad para describir la cinética de extracción en este sistema. Este estudio proporciona una base para la optimización de procesos de extracción de compuestos bioactivos, proponiendo al modelo de Page como una herramienta robusta para diversas aplicaciones industriales.

Palabras clave: Cálices de Jamaica, Folin-Ciocalteu, Modelo matemático

Abstract

This study aimed to evaluate the applicability of Page's equation to model the solid-liquid extraction kinetics of total polyphenols from calyxes of *Hibiscus sabdariffa* L. Aqueous extracts were obtained with ultrasound assistance, evaluating the effect of three temperatures (30, 40 and 50 °C) and six extraction times (10, 20, 30, 40, 50 and 60 min). Quantification of total polyphenols was performed using the Folin-Ciocalteu method. The kinetics was modeled by fitting the experimental data to Page's mathematical model, the validity of which was checked by calculating Pearson's correlation coefficient. The results showed that increasing temperature and time had a positive and significant impact on polyphenol extraction, with concentrations ranging from 0.16 to 0.69 g GAE/100 g dry matter. The data were an accurate fit to Page's model, supported by Pearson coefficients between 0.996 and 0.999, highlighting its suitability for describing the extraction kinetics in this system. This study provides a basis for the optimization of extraction processes of bioactive compounds, proposing the Page model as a robust tool for various industrial applications.

Keywords: Jamaican calyxes, Folin-Ciocalteu, Mathematical model.

Resumo

Este estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade da equação de Page para modelar a cinética de extração sólido-líquido de polifenóis totais de cálices de *Hibiscus sabdariffa* L. Extratos aquosos foram obtidos com auxílio de ultrassom, avaliando-se o efeito de três temperaturas (30, 40 e 50 °C) e seis tempos de extração (10, 20, 30, 40, 50 e 60 min). A quantificação dos polifenóis totais foi efectuada pelo método de Folin-Ciocalteu. A cinética foi modelada através da adaptação dos dados experimentais ao modelo matemático de Page, cuja validade foi verificada através do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura e do tempo teve um impacto positivo e significativo na extração de polifenóis, com concentrações que variaram entre 0,16 e 0,69 g EAG/100 g de matéria seca. Os dados ajustaram-se com precisão ao modelo de Page, apoiado por coeficientes de Pearson entre 0,996 e 0,999, destacando a sua adequação para descrever a cinética de extração neste sistema. Este estudo fornece uma base para a otimização dos processos de extração de compostos bioactivos, propondo o modelo de Page como uma ferramenta robusta para várias aplicações industriais.

Palavras-chave: Cálices da Jamaica, Folin-Ciocalteu, Modelo matemático.

Introducción

La creciente demanda de compuestos bioactivos naturales con propiedades funcionales y beneficios para la salud ha impulsado el estudio de procesos de extracción eficientes y sostenibles. Entre estos compuestos, los polifenoles destacan por su capacidad antioxidante y antiinflamatoria, así como por su potencial en la prevención de enfermedades crónicas como el cáncer, la diabetes y las afecciones cardiovasculares (Raposo et al., 2024). En este contexto, *Hibiscus sabdariffa* L., comúnmente conocida como rosella o flor de Jamaica, se presenta como una fuente rica en polifenoles totales, incluidos antocianinas, flavonoides y ácidos fenólicos, con concentraciones que pueden superar los 20 mg de equivalentes de ácido gálico por gramo de peso seco (Kourelatou et al., 2024). Además de sus propiedades nutracéuticas, *H. sabdariffa* posee aplicaciones comerciales en la industria alimentaria y farmacéutica, lo que ha generado un creciente interés en optimizar su proceso de extracción.

La extracción sólido-líquido, técnica comúnmente utilizada para la recuperación de polifenoles, presenta una cinética compleja influenciada por diversos factores, como la temperatura, el tipo de disolvente y el tiempo de extracción (Luna-Fox et al., 2024). Tradicionalmente, se han empleado modelos matemáticos para describir y predecir el comportamiento de estos procesos, siendo el modelo de Page uno de los más utilizados debido a su versatilidad y capacidad para ajustar datos experimentales de manera precisa (Sridhar et al., 2021). Este modelo empírico, desarrollado inicialmente para describir el secado de materiales biológicos, también se ha adaptado con éxito a procesos de extracción sólido-líquido, proporcionando información valiosa sobre los mecanismos de transferencia de masa y los parámetros cinéticos asociados.

Diversos estudios han resaltado la importancia de modelar matemáticamente la extracción de polifenoles en matrices vegetales. Por ejemplo, Stela-Jokić et al. (2010) emplearon el modelo de Page para describir la extracción de polifenoles en extractos acuosos

de soya, obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) superior a 0,99, lo que evidencia la robustez del modelo. En el caso de *H. sabdariffa*, se ha documentado que factores como la temperatura del medio de extracción, que suele oscilar entre 40 y 80 °C, y la acidez del disolvente impactan significativamente en la eficiencia del proceso, con incrementos en la recuperación de polifenoles totales hasta del 35 % al optimizar dichas condiciones (Singh et al., 2021).

El aprovechamiento de *H. sabdariffa* en forma de extractos ricos en polifenoles también responde a preocupaciones globales relacionadas con la sostenibilidad y el uso eficiente de los recursos naturales. La extracción sólido-líquido no solo permite la recuperación de compuestos valiosos a partir de materiales vegetales, sino que también minimiza el desperdicio, contribuyendo al desarrollo de una economía circular en la industria alimentaria y farmacéutica (Piovesana & Noreña, 2019). Además, la aplicación del modelado matemático facilita la identificación de condiciones óptimas para maximizar el rendimiento y la calidad del extracto obtenido, lo que se traduce en una reducción significativa del consumo de energía y disolventes.

El modelo de Page, en particular, ofrece ventajas sobre otros modelos cinéticos debido a su capacidad para representar tanto la fase rápida inicial, dominada por la transferencia de masa superficial, como la fase más lenta asociada con la difusión interna. Este modelo ha sido validado en una amplia gama de sistemas y condiciones, mostrando un error promedio relativo inferior al 5 % en el ajuste de datos experimentales (Thao et al., 2023). Sin embargo, su aplicación específica en la extracción de polifenoles totales de *H. sabdariffa* aún es limitada, lo que resalta la necesidad de investigaciones que integren esta metodología con datos experimentales robustos y controlados.

En este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar la aplicabilidad de la ecuación de Page para modelar la extracción sólido-líquido de polifenoles totales de *Hibiscus sabdariffa* L.

Metodología

Materia prima

Los cálices frescos de *H. sabdariffa* se obtuvieron en un mercado local ubicado en la ciudad de Puyo, provincia de Pastaza, Ecuador, con coordenadas 1.4837° S y 78.0026° W. Posteriormente, se lavaron utilizando agua destilada para eliminar residuos y materiales extraños, y se dejaron secar a la sombra bajo condiciones ambientales normales de temperatura y ventilación. Luego, los cálices se deshidrataron en una estufa (marca: Memmert, modelo: SFE700) a 40 °C durante 48 horas. El contenido de humedad fue determinado mediante la diferencia de peso empleando la ecuación (1), y este valor se utilizó para calcular la masa inicial de los cálices basada en materia seca. Finalmente, el material seco se trituró y tamizó para obtener un tamaño de partícula inferior a 1 mm.

$$\%H = 100 - \frac{w_s}{w_f} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde w_f representa la masa fresca de los cálices (g), y w_s la masa de los cálices después del secado (g).

Extracción de compuestos polifenólicos totales (CPT)

Para la preparación de los extractos se empleó un baño termostático (marca Wisd.23, modelo WUC-DO6H), siguiendo la metodología descrita por Luna-Fox et al. (2024). Las extracciones se realizaron manteniendo tres temperaturas constantes (30, 40 y 50 °C) y seis intervalos de tiempo diferentes (10, 20, 30, 40, 50 y 60 min). Se utilizó una proporción sólido-líquido de 1:10 empleando agua como disolvente. Los extractos acuosos recolectados fueron

sometidos a filtración mediante papel filtro con un tamaño de poro de 1,2 μm y posteriormente se llevaron a cabo los análisis correspondientes de manera inmediata.

Cuantificación de CPT

El análisis de polifenoles totales se realizó mediante el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu (Arteaga-Crespo et al., 2024). A 1.000 μL del extracto acuoso se adicionaron 500 μL de reactivo Folin-Ciocalteu diluido en agua destilada en una proporción 1:1. Las muestras se mantuvieron en reposo por un lapso de 10 minutos para permitir la reacción inicial. Posteriormente, se incorporaron 500 μL de una disolución de carbonato de sodio (Na_2CO_3) al 20% y se ajustó el volumen total a 10 mL utilizando agua destilada. Las muestras se dejaron reaccionar durante 2 horas en condiciones de oscuridad para evitar la interferencia de la luz. La absorbancia de las disoluciones se determinó a 765 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis (marca Perkin Elmer). Los resultados obtenidos se expresaron en gramos equivalentes de ácido gálico por cada 100 gramos de materia seca (g EAG/100 g ms), utilizando la ecuación derivada del modelo matemático (2) generado a partir de la curva de calibración construida con de ácido gálico.

$$A=0,0734C-0,0028 \quad (2)$$

Donde: A representa la absorbancia de las muestras y C la concentración de CPT (mg/L)

Modelación matemática

La modelación de la extracción de CPT se realizó mediante la ecuación de Page (3) propuesta por Roberts et al. (2008).

$$C_t = e^{-k \cdot t^n} \quad (3)$$

Donde C_t representa la concentración de CPT en función del tiempo (t) y k es la constante de velocidad. La ecuación de Page puede escribirse linealizada como la ecuación (4).

$$\ln[-\ln(C_t)] = \ln(k) + n \cdot \ln(t) \quad (4)$$

Los valores de k y n se determinaron trazando la curva $\ln[-\ln(C_t)]$ contra $\ln(t)$

Análisis estadístico

Todos los ensayos analíticos se realizaron por triplicado para minimizar posibles errores experimentales. La concentración de CPT fue expresada como valores promedio acompañados de su desviación estándar (\pm) con un $n=3$. Para evaluar la influencia de los factores experimentales, como la temperatura y el tiempo de extracción, sobre el rendimiento de CPT, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) empleando el software Design Expert versión 13. Las representaciones gráficas fueron generadas mediante el software Origin versión 2022. La validez del modelo matemático se confirmó calculando el coeficiente de correlación de Pearson, siguiendo la ecuación (5).

$$r = \frac{\sum(e_i - \bar{e}) \cdot (p_i - \bar{p})}{\sqrt{\sum(e_i - \bar{e})^2 \cdot \sum(p_i - \bar{p})^2}} \quad (5)$$

Donde e_i y p_i son respectivamente los resultados experimentales y los predichos por el modelo de Page; \bar{e} y \bar{p} son las medias de los valores de e_i y p_i respectivamente.

Resultados

1.1. Efecto de las variables de estudio sobre la extracción de CPT

Los resultados presentados en la Tabla 1 muestran que el tiempo y la temperatura de extracción tuvieron un impacto significativo sobre la extracción de CPT, con un p-valor inferior a 0,05 para ambas variables. Este resultado indica que la variabilidad en la extracción de CPT puede ser explicada de manera significativa por estos dos factores. Los valores de la estadística F de Fisher refuerzan aún más esta conclusión. Para la variable temperatura, el valor de F fue de 215,73, y para el tiempo de extracción fue de 307,41. Estos valores de F muestran que la variabilidad debida a cada una de estas variables es considerablemente mayor que la variabilidad no explicada por el modelo. Además, el análisis de la falta de ajuste del modelo mostró que no existe evidencia significativa de un mal ajuste, ya que el p-valor asociado fue

superior a 0,05. Esto implica que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos experimentales, lo que aumenta la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Las variables de estudio mostraron un efecto proporcional sobre la extracción de CPT, como se observa en la Figura 1A. Los resultados obtenidos para los polifenoles indicaron que la temperatura de extracción juega un papel crucial en la cantidad de compuestos extraídos. A una temperatura de 30°C, los niveles de polifenoles variaron entre 0,16 y 0,49 g EAG/100g ms. Al aumentar la temperatura a 40°C, la cantidad de polifenoles extraídos aumentó, con valores que oscilaron entre 0,22 y 0,51 g EAG/100g ms. Este incremento se hizo aún más evidente a 50°C, donde los valores de polifenoles se situaron entre 0,30 y 0,69 g EAG/100g ms, mostrando una extracción más eficiente a temperaturas más altas.

Por otro lado, los resultados obtenidos cumplieron con el supuesto de distribución normal (Figura 1B) lo que indican que los datos no presentan sesgos o irregularidades significativas y que el proceso de extracción sigue un comportamiento predecible. La normalidad en los resultados también refuerza la validez y confiabilidad de los análisis realizados, ya que implica que la variabilidad observada en los datos sigue una distribución esperada, lo que facilita la interpretación estadística de los mismos.

Tabla 1.

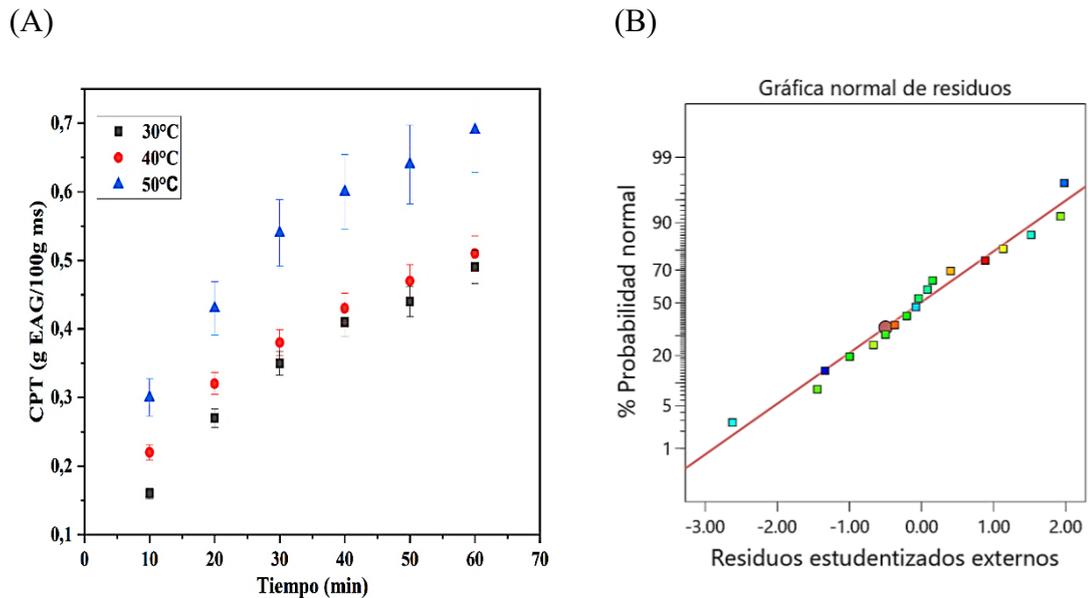
ANOVA para el efecto de la temperatura y tiempo de extracción sobre el contenido de CPT

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	F-valor	p-valor	
Polifenoles totales	0.3411	5	0.0682	215.73	< 0.0001	Significativo
A-Temperatura	0.0972	1	0.0972	307.41	0.0001	
B-Tiempo	0.2208	1	0.2208	698.44	< 0.0001	
Residual	0.0038	12	0.0003			
Falta de ajuste	1.322E-08	1	1.322E-08	0.8462	0.9127	No significativo
Error puro	0.1838	1	0.0238			

Nota: Autores (2025).

Figura 1.

Curvas de extracción de CPT (A) y distribución normal (B) de los resultados experimentales.



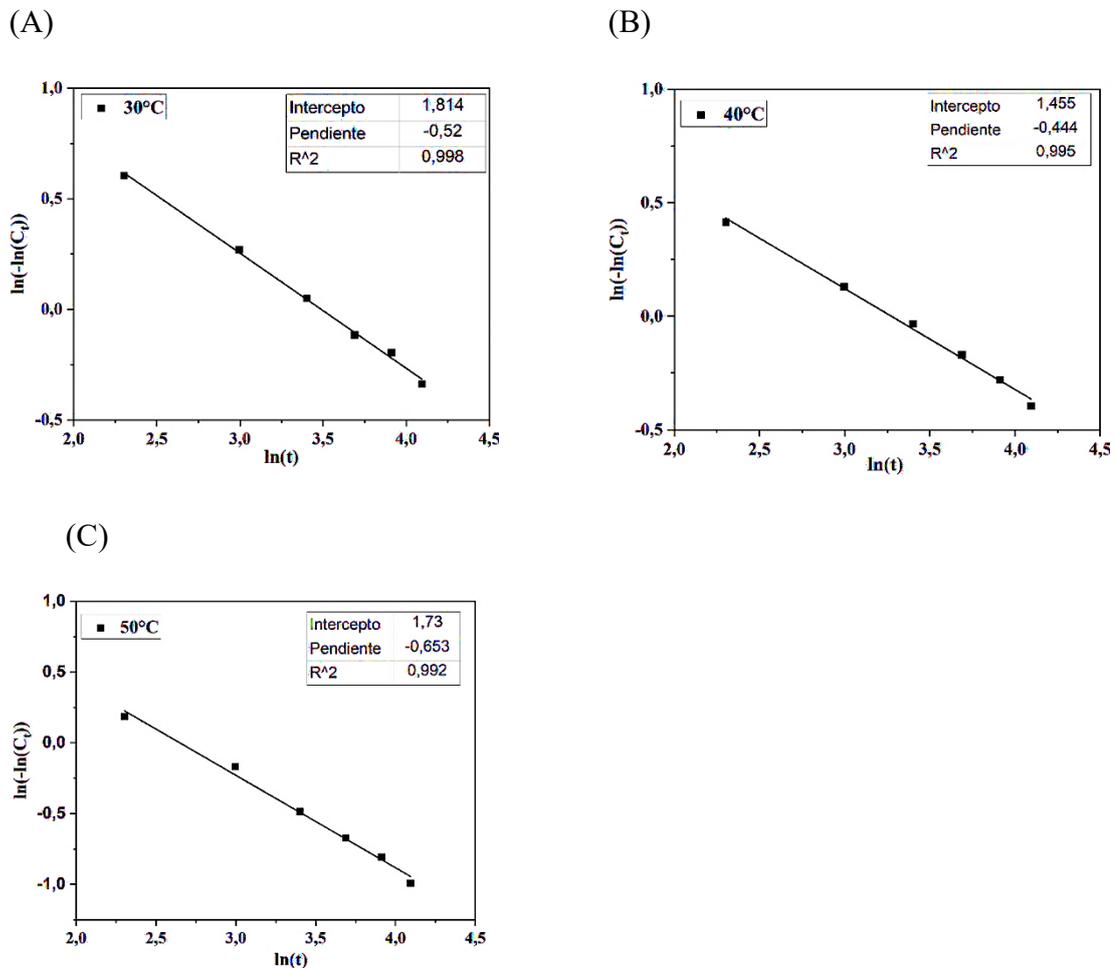
Nota: Autores (2025).

1.2. Modelado matemático

Los resultados obtenidos para la extracción de CPT mostraron un buen ajuste al modelo de Page. Los coeficientes de determinación (R^2) fueron de 0,992, 0,995 y 0,998 para las extracciones realizadas a 30°C, 40°C y 50°C, respectivamente (Figura 2). Estos valores muestran que el modelo de Page describe de manera precisa la dinámica de extracción de CPT bajo las condiciones experimentales utilizadas. La tendencia de aumento en los valores de R^2 con el incremento de la temperatura también indica que el modelo es particularmente robusto en la descripción del proceso a temperaturas más altas, lo que refuerza la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Figura 2.

Validación del modelo de Page en la extracción de CPT obtenidos a 30°C (A), 40°C (B) y 50°C (C).



Nota: Autores (2025).

Los valores de las constantes de velocidad (k) y el exponente (n) del modelo de Page, fueron determinados a partir de la gráfica de la ecuación (4), donde el intercepto de la recta corresponde al valor de la constante k y la pendiente a la estimación de n (Tabla 2). Estos parámetros fueron fundamentales para comprender la cinética de la extracción, ya que k refleja la rapidez con la que se produce la extracción de CPT, mientras que n indica la relación entre la cantidad de soluto extraído y el tiempo o la temperatura de extracción.

Tabla 2.

Determinación de los parámetros k y n del modelo de Page.

Temperatura (°C)	n	$\ln(k)$	k
30	-0,520	1,814	6,135
40	-0,444	1,455	4,284
50	-0,653	1,730	5,641

Nota: Autores (2025).

Los modelos matemáticos desarrollados para predecir la concentración de CPT bajo las condiciones experimentales estudiadas fueron los siguientes:

$$C_{t30^{\circ}C} = e^{-6,135 \cdot t^{-0,520}} \quad (6)$$

$$C_{t40^{\circ}C} = e^{-4,284 \cdot t^{-0,444}} \quad (7)$$

$$C_{t50^{\circ}C} = e^{-5,641 \cdot t^{-0,653}} \quad (8)$$

Donde C_t representa la concentración de CPT en un intervalo de 10 a 60 min.

1.3. Validación del modelo matemático

Los modelos matemáticos fueron validados mediante el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson (r), una medida estadística que evalúa la fuerza y dirección de la relación lineal entre los datos experimentales y los valores predichos por los modelos. Los resultados obtenidos mostraron valores de 0,999, 0,998 y 0,996 para los datos de CPT extraídos a 30°C, 40°C y 50°C, respectivamente (Figura 3). Estos valores cercanos a 1 indican una buena concordancia entre los datos observados y las predicciones del modelo, lo que valida la capacidad de los modelos matemáticos para describir con precisión el comportamiento de la extracción de CPT bajo las condiciones experimentales estudiadas.

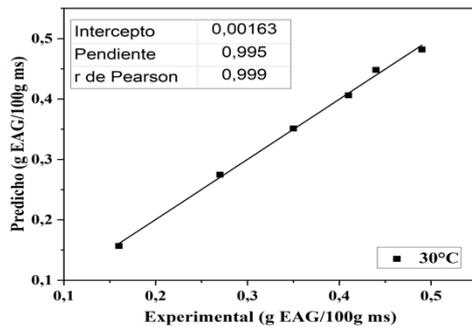
En la Tabla 3 se presenta una comparación detallada entre los resultados de CPT obtenidos experimentalmente y aquellos predichos por el modelo de Page. Esta comparación

permite evaluar la precisión del modelo en la estimación de la cantidad de CPT brindando una visión clara sobre la fiabilidad y validez de las predicciones del modelo en relación con los datos observados.

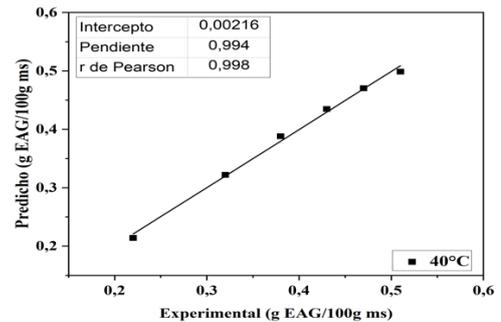
Figura 3.

Cálculo del coeficiente de Pearson para los resultados experimentales y predichos por el modelo de Page a 30°C (A), 40°C (B) y 50°C (C).

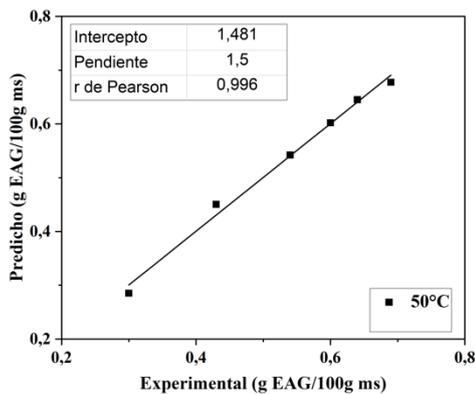
(A)



(B)



(C)



Nota: Autores (2025).

Tabla 3.

Resultados de CPT expresados en g EAG/100g ms, obtenidos experimentalmente y predichos por el modelo de Page.

Tiempo	30°C		40°C		50°C	
min	Experimental	Predicho	Experimental	Predicho	Experimental	Predicho
10	0,16±0,02	0,16	0,22±0,01	0,21	0,30±0,01	0,29
20	0,27±0,01	0,27	0,32±0,01	0,32	0,43±0,01	0,45
30	0,35±0,01	0,35	0,38±0,02	0,39	0,54±0,02	0,54
40	0,41±0,02	0,41	0,43±0,01	0,43	0,60±0,02	0,60
50	0,44±0,03	0,45	0,47±0,02	0,47	0,64±0,01	0,65
60	0,49±0,01	0,48	0,51±0,01	0,50	0,69±0,00	0,68

Nota: Autores (2025).

Discusión

Los resultados de CPT obtenidos en este estudio fueron inferiores a los reportados en estudios previos. Por ejemplo, Singh et al. (2021) reportaron concentraciones de CPT entre 1,15 y 3,74 g EAG/100g ms en extractos metanólicos a partir de cálices recolectados en Australia, mientras que Şahin et al. (2020) documentaron 2,28 g EAG/100g ms en extractos acuosos con asistencia de ultrasonido. Por su parte, Piovesana and Noreña (2019) encontraron concentraciones de 1,76 g EAG/100g ms en extractos acuosos elaborados por decocción. Estas discrepancias pueden atribuirse a diferencias en los disolventes utilizados, las tecnologías aplicadas durante la extracción y las características propias de las materias primas estudiadas. El empleo de agua como disolvente en este estudio, a diferencia del uso de metanol u otros disolventes orgánicos, limita parcialmente la solubilización de compuestos fenólicos, pero prioriza la sostenibilidad ambiental y la inocuidad. Finalmente, factores como las condiciones edafoclimáticas y genéticas de los cálices ecuatorianos empleados, así como los tiempos y

temperaturas de extracción relativamente moderados, también incidieron en los rendimientos reportados, al preservar la estabilidad de los compuestos bioactivos y reducir su degradación térmica.

La temperatura y el tiempo de extracción tuvieron un impacto positivo y significativo sobre la concentración de CPT. Esto sugiere que, a mayores temperaturas y tiempos prolongados, la extracción de CPT incrementó proporcionalmente. Este comportamiento está alineado con estudios previos, como el de Luna-Fox et al. (2023), quienes reportaron un efecto positivo de la temperatura y el tiempo sobre la extracción de polifenoles en hojas secas de *Ilex guayusa* Loes. De manera similar, Dent et al. (2013) observaron que, en extractos de Salvia, la concentración de CPT aumentaba proporcionalmente con incrementos en la temperatura y el tiempo de extracción. Además, el trabajo de Antony y Farid (2022) indicó que en *Thymus vulgaris*, la temperatura de extracción de 200 °C incrementó considerablemente la concentración de compuestos fenólicos específicos, aunque temperaturas más altas redujeron la diversidad de tipos de polifenoles obtenidos. Estas comparaciones destacan que las condiciones óptimas de extracción pueden variar significativamente dependiendo de la especie vegetal y los parámetros empleados. El aumento en la concentración de CPT con temperaturas más altas y tiempos prolongados se puede atribuir a una mayor solubilización de los compuestos fenólicos debido a la disrupción de las paredes celulares y al incremento de la difusión de los metabolitos hacia el medio disolvente. Asimismo, la elevación térmica disminuye la viscosidad del disolvente y mejora la interacción sólido-líquido, facilitando el transporte de compuestos fenólicos hacia la fase líquida. Sin embargo, temperaturas excesivamente altas pueden ocasionar degradación térmica de ciertos compuestos sensibles, lo que resalta la importancia de establecer un equilibrio entre maximizar la extracción y preservar la integridad de los metabolitos bioactivos.

Los CPT mostraron un buen ajuste al modelo de Page. Los coeficientes de determinación (R^2) fueron de 0,992, 0,995 y 0,998 para las extracciones realizadas a 30 °C, 40 °C y 50 °C, respectivamente. Este nivel de ajuste refleja la capacidad del modelo de Page para describir con precisión el comportamiento cinético en el proceso de extracción, coincidiendo con lo reportado por Stela-Jokić et al. (2010), quienes aplicaron el modelo a la extracción de polifenoles en *Glycine max*, alcanzando un R^2 de 0,996. Otro estudio relevante, llevado a cabo por Tindal et al. (2021) aplicó este modelo en la extracción de compuestos fenólicos de vino tinto y reportó un R^2 superior a 0,99, destacando su idoneidad para predecir dinámicas similares en diferentes matrices vegetales. El modelo de Page se distingue por su flexibilidad y precisión para describir procesos de extracción que involucran transferencia de masa dependiente del tiempo y las condiciones térmicas. En este estudio, el alto coeficiente de determinación registrado sugiere una descripción precisa del proceso, permitiendo inferir que el modelo es no solo aplicable, sino altamente eficaz para describir la extracción sólido-líquido de polifenoles totales en cálices de *H. sabdariffa*. Este aporte reafirma la relevancia del modelo en la optimización de procesos industriales para la obtención de compuestos bioactivos a partir de fuentes vegetales.

Conclusión

En este estudio se demostró que la temperatura y el tiempo de extracción tuvieron un impacto significativo y positivo en la recuperación de polifenoles totales a partir de cálices de *Hibiscus sabdariffa* L. El incremento de la temperatura y el tiempo favoreció la difusión de los compuestos fenólicos desde la matriz vegetal hacia el disolvente, logrando mayores rendimientos de extracción.

El modelo de Page mostró un buen ajuste a los datos experimentales, como lo indican los altos coeficientes de determinación ($R^2 = 0.992-0.998$) en las extracciones realizadas a

diferentes temperaturas. Este nivel de ajuste refleja la capacidad del modelo para describir con precisión la cinética de extracción de polifenoles totales en los cálices de *Hibiscus sabdariffa* L.

Esta investigación aporta un enfoque sistemático para optimizar la extracción de polifenoles totales en *Hibiscus sabdariffa* L., validando la aplicabilidad del modelo de Page en condiciones específicas de temperatura y tiempo. Los resultados generan datos valiosos que podrían ser empleados para el diseño de procesos a escala industrial, contribuyendo a una extracción más eficiente y sostenible de compuestos bioactivos con aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética.

Referencias bibliográficas

- Antony, A., & Farid, M. (2022). Effect of Temperatures on Polyphenols during Extraction. *Applied Sciences*, 12(4), 2107. <https://doi.org/10.3390/app12042107>
- Arteaga-Crespo, Y., Radice, M., Bravo-Sanchez, L. R., García-Quintana, Y., & Scalvenzi, L. (2019). Optimisation of ultrasound-assisted extraction of phenolic antioxidants from *Ilex guayusa* Loes. leaves using response surface methodology. *Heliyon*, 6(1), e03043. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03043>
- Dent, M., Dragović-Uzelac, V., Penić, M., Bosiljkov, T., & Levaj, B. (2013, 29 marzo). The Effect of Extraction Solvents, Temperature and Time on the Composition and Mass Fraction of Polyphenols in Dalmatian Wild Sage (*Salvia officinalis* L.) Extracts. <https://hrcak.srce.hr/99751>
- Kourelatou, A., Chatzimitakos, T., Athanasiadis, V., Kotsou, K., Makrygiannis, I., Bozinou, E., & Lalas, S. I. (2024). Seeking Optimal Extraction Method for Augmenting *Hibiscus sabdariffa* Bioactive Compounds and Antioxidant Activity. *Processes*, 12(3), 581. <https://doi.org/10.3390/pr12030581>
- Luna-Fox, S., Álvarez-Castro, R., Radice, M., Scalvenzi, L., Arteaga-Crespo, Y., López-Hernández, O., & Bravo-Sánchez, L. (2023). Elaboración de un preparado hidrosoluble en forma de sólido pulverulento a partir de *Ilex guayusa* Loes. *La Técnica Revista de las Agrocencias* ISSN 2477-8982, 13(1). <https://doi.org/10.33936/latecnica.v13i1.5725>
- Luna-Fox, S., Uvidia-Armijo, J., & Rivera-Barreto, J. (2024). Kinetic study of solid-liquid extraction of caffeine in *Ilex guayusa* Loes. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 41(3), e244128. [https://doi.org/10.47280/revfacagron\(luz\).v41.n3.08](https://doi.org/10.47280/revfacagron(luz).v41.n3.08)
- Piovesana, A., & Noreña, C. P. Z. (2019). Study of Acidified Aqueous Extraction of Phenolic Compounds from *Hibiscus sabdariffa* L. calyces. *The Open Food Science Journal*,

- 11(1), 25-34. <https://doi.org/10.2174/1874256401911010025>
- Piovesana, A., & Noreña, C. P. Z. (2019). Study of Acidified Aqueous Extraction of Phenolic Compounds from *Hibiscus sabdariffa* L. calyces. *The Open Food Science Journal*, 11(1), 25-34. <https://doi.org/10.2174/1874256401911010025>
- Raposo, F., Borja, R., & Gutiérrez-González, J. A. (2024). A comprehensive and critical review of the unstandardized Folin-Ciocalteu assay to determine the total content of polyphenols: The conundrum of the experimental factors and method validation. *Talanta*, 272, 125771. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.125771>
- Roberts, J. S., Kidd, D. R., & Padilla-Zakour, O. (2008). Drying kinetics of grape seeds. *Journal Of Food Engineering*, 89(4), 460-465. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.05.030>
- Şahin, S., Pekel, A. G., & Toprakçı, İ. (2020). Sonication-assisted extraction of *Hibiscus sabdariffa* for the polyphenols recovery: application of a specially designed deep eutectic solvent. *Biomass Conversion And Biorefinery*, 12(11), 4959-4969. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00837-4>
- Singh, M., Thrimawithana, T., Shukla, R., & Adhikari, B. (2021). Extraction and characterization of polyphenolic compounds and potassium hydroxycitrate from *Hibiscus sabdariffa*. *Future Foods*, 4, 100087. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100087>
- Singh, M., Thrimawithana, T., Shukla, R., & Adhikari, B. (2021). Extraction and characterization of polyphenolic compounds and potassium hydroxycitrate from *Hibiscus sabdariffa*. *Future Foods*, 4, 100087. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100087>
- Sridhar, A., Ponnuchamy, M., Kumar, P. S., Kapoor, A., Vo, D. N., & Prabhakar, S. (2021). Techniques and modeling of polyphenol extraction from food: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 3409-3443. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01217-8>
- Stela-Jokić, D., Mate-Bilić, A., Buić-oić, M., & Srećko, T. (2010). Modelling of the Process of Solid-Liquid Extraction of Total Polyphenols from Soybeans. *Czech J. Food Sci*, 28, 206-212. <https://www.agriculturejournals.cz/pdfs/cjf/2010/03/07.pdf>
- Thao, B. T. T., Vo, T. T. K., Tran, T. y. N., Le, D. T., Tran, T. T., Bach, L. G., & Dao, T. P. (2023). Application of mathematical techniques to study the moisture loss kinetics and polyphenol degradation kinetics of mango (*Mangifera indica* L.) slices during heat pump drying by pilot equipment. *LWT*, 176, 114454. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114454>
- Tindal, R., Jeffery, D., & Muhlack, R. (2021). Mathematical modelling to enhance winemaking efficiency: a review of red wine colour and polyphenol extraction and evolution. *Australian Journal Of Grape And Wine Research*, 27(2), 219-233. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12488>