

## Comparación de diferentes métodos en la extracción de aceite esencial de rizomas de *Hedychium coccineum*: composición química y actividad biológica

### Comparison of different methods in the extraction of essential oil from rhizomes of *Hedychium coccineum*: chemical composition and biological activity

Eunice Ríos Vásquez<sup>1,2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9254-1079>,  
Nayeli Milena Estrada Mesa<sup>1,2</sup> <https://orcid.org/0009-0002-1148-4912>,  
Yeferson Ospina Balvuela<sup>1,2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8350-2695>

- <sup>1</sup>. Grupo Químico de Investigación y Desarrollo Ambiental, Facultad de Ciencias Básicas y Tecnologías, Universidad del Quindío, Carrera 15 Calle 12N, Armenia, Quindío, Colombia  
<sup>2</sup>. Programa de Química, Facultad de Ciencias Básicas y Tecnologías, Universidad del Quindío, Carrera 15 Calle 12N, Armenia, Quindío, Colombia

Recibido: Julio 15 de 2025

Aceptado: Octubre 25 de 2025

\*Correspondencia del autor: Eunice Ríos Vásquez

E-mail: [erios@uniquindio.edu.co](mailto:erios@uniquindio.edu.co)

<https://doi.org/10.47499/revistaacbv.v1i37.328>

#### Resumen

**Introducción.** Las plantas de la familia Zingiberaceae constituyen una fuente relevante de metabolitos bioactivos con aplicaciones terapéuticas y biotecnológicas. Entre ellas, *Hedychium coccineum* se caracteriza por rizomas ricos en aceites esenciales AE con propiedades antimicrobianas, antioxidantes y repelentes de insectos. **Objetivo.** Optimizar la extracción de AE a partir de rizomas de *H. coccineum* mediante hidrodestilación asistida por microondas (HDAM), comparándola con pretratamiento ultrasónico (US+HDAM) y con hidrodestilación convencional (HD). **Materiales y métodos.** Se empleó un diseño Box-Behnken para evaluar tiempo, potencia y relación sólido-líquido, los AE se caracterizaron por cromatografía de gases-espectrometría de masas y analizaron sus propiedades fisicoquímicas, consumo energético, emisiones de CO<sub>2</sub>, actividad repelente frente a *Sitophilus* spp. y capacidad antioxidante mediante el ensayo DPPH. **Resultados.** El modelo de optimización mostró alta confiabilidad ( $R^2 = 0.9962$ ,  $p < 0.0001$ ) y permitió determinar condiciones óptimas para HDAM (50 min, 600 W, 1:11 g/mL), con un rendimiento de 0.2219 %. El método US+HDAM alcanzó el mayor rendimiento (0.3045 %), superando significativamente a HD (0.1846 %), además de reducir el consumo energético ( $\leq 0.535$  kWh) y las emisiones de CO<sub>2</sub> ( $\leq 0.428$  kg) en comparación con la técnica convencional (2.2 kWh; 1.76 kg). Se identificaron 32 compuestos principales, entre ellos linalool, (E)-nerolidol, acetato de bornilo y artemisia cetona. El AE mostró fuerte efecto repelente dependiente de dosis y tiempo, con porcentajes cercanos al 100 % a concentraciones  $\geq 0.503$   $\mu\text{L}/\text{cm}^2$  durante las primeras 12 horas, así como actividad antioxidante moderada con un IC<sub>50</sub> de 24.79 mg/mL. **Conclusión.** Se evidencia que las tecnologías emergentes mejoran la eficiencia, reducen el impacto ambiental y preservan la composición química del aceite, posicionando a *H. coccineum* como una fuente prometedora de compuestos con aplicaciones en biocontrol y formulaciones terapéuticas.

**Palabras clave:** Zingiberaceae, *Hedychium*, ultrasonido, microondas, *Sitophilus*.

## Abstract

**Introduction.** Plants of the Zingiberaceae family are an important source of bioactive metabolites with therapeutic and biotechnological applications. Among them, *Hedychium coccineum* is characterized by rhizomes rich in essential oils (EO) with antimicrobial, antioxidant, and insect repellent properties. Aim. To optimize the extraction of AE from *H. coccineum* rhizomes using microwave-assisted hydrodistillation (MAHD), comparing it with ultrasonic pretreatment (US+MAHD) and conventional hydrodistillation (HD). **Materials and methods.** A Box-Behnken design was used to evaluate time, power, and solid-liquid ratio. The EO were characterized by gas chromatography-mass spectrometry and analyzed for their physicochemical properties, energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions, repellent activity against *Sitophilus spp.*, and antioxidant capacity using the DPPH assay. **Results.** The optimization model showed high reliability ( $R^2 = 0.9962$ ,  $p < 0.0001$ ) and allowed the determination of optimal conditions for MAHD (50 min, 600 W, 1:11 g/mL), with a yield of 0.2219%. The US+MAHD method achieved the highest yield (0.3045%), significantly exceeding HD (0.1846%), in addition to reducing energy consumption ( $\leq 0.535$  kWh) and CO<sub>2</sub> emissions ( $\leq 0.428$  kg) compared to the conventional technique (2.2 kWh; 1.76 kg). Thirty-two main compounds were identified, including linalool, (E)-nerolidol, bornyl acetate, and artemisia ketone. The EO showed a strong dose- and time-dependent repellent effect, with percentages close to 100% at concentrations  $\geq 0.503$   $\mu\text{L}/\text{cm}^2$  during the first 12 hours, as well as moderate antioxidant activity with an IC<sub>50</sub> of 24.79 mg/mL. **Conclusion.** Evidence shows that emerging technologies improve efficiency, reduce environmental impact, and preserve the chemical composition of the oil, positioning *H. coccineum* as a promising source of compounds with applications in biocontrol and therapeutic formulations.

**Keywords:** Zingiberaceae, *Hedychium*, ultrasound, microwave, *Sitophilus*.

## 1. Introducción

Las plantas aromáticas y medicinales tienen una larga historia de uso efectivo y prometedor en la actividad humana. Sin embargo, los problemas de salud actuales exigen una mayor investigación científica que permitan encontrar nuevas plantas y compuestos bioactivos con propiedades terapéuticas que fortalezcan la fitoterapia. (1) Dentro de este contexto, la familia Zingiberaceae destaca por su diversidad y potencial terapéutico, siendo las más apreciable dentro del orden Zingiberales; ya que sus miembros incluyen diversos constituyentes bioactivos como los diarilheptanoides y AE con gran valor etnofarmacológico. Con más de 50 géneros y 1300 especies, esta familia botánica se distribuye ampliamente en zonas tropicales y subtropicales, especialmente en el sur y sudeste de Asia. Numerosos géneros, entre ellos *Alpinia*, *Zingiber*, *Curcuma*, *Hedychium*, *Amomum*, *Elettaria* y *Kaempferia*, son valorados por sus aplicaciones medicinales, como lo ilustran especies importantes como el jengibre de Java, la cúrcuma, la galanga y el jengibre. (2)

*Hedychium coccineum*, una especie herbácea perenne de la familia Zingiberaceae, es nativa de las regiones montañosas del Himalaya y Sudeste Asiático. Comúnmente conocida como lirio de jengibre escarlata, esta planta se caracteriza por sus inflorescencias densas y

vistasas. Sus rizomas presentan propiedades medicinales tradicionales, siendo utilizados en la fitoterapia para aliviar síntomas febriles, cefaleas y mialgias. (3) El perfil químico del AE de los rizomas de *H. coccineum* se caracteriza por la presencia mayoritaria de monoterpenos como  $\alpha$ -pineno,  $\beta$ -pineno y linalool, además de sesquiterpenos como el nerolidol, espatulenol y óxido de humuleno. Estudios previos han demostrado la versatilidad biológica de este AE, destacando sus propiedades antimicrobianas, insecticidas y nematocidas, así como su potencial como herbicida y agente antiproliferativo. (4)

Los AE son compuestos orgánicos volátiles, predominantemente de carácter terpénicos, extraídos de diversas partes de plantas como flores, tallos, hojas, semillas, raíces y madera. Su compleja composición química les confiere una amplia gama de propiedades biológicas, lo que los convierte en ingredientes clave en numerosas industrias, destacando la farmacéutica, alimentaria y cosmética, donde se valoran por sus actividades terapéuticas, aromatizantes y funcionales. (5) Los métodos convencionales de extracción de AE, caracterizados por el uso de altas temperaturas y disolventes orgánicos tóxicos, presentan limitaciones en términos de eficiencia energética y preservación de compuestos bioactivos. Estas técnicas suelen exigir largos tiempos de proceso y

generan un impacto ambiental considerable. Por el contrario, las tecnologías emergentes, como la extracción asistida por microondas, ultrasonido y fluidos supercríticos, ofrecen una alternativa más sostenible y eficiente, permitiendo obtener mayores rendimientos y compuestos de mayor calidad, al tiempo que reducen el consumo energético y la generación de residuos. (6,7)

Además de las notables actividades demostradas por los AE, se ha evidenciado un creciente interés en su aplicación para el biocontrol de insectos plaga como los gorgojos y otros insectos. Estas plagas constituyen una seria amenaza económica, al ocasionar daños tanto en los cultivos como en los productos almacenados. Sin embargo, en los últimos años ha resurgido el interés por evaluar insecticidas de origen botánico, como los AE, debido a que los pesticidas sintéticos generan efectos nocivos sobre organismos no objetivo, alteran el equilibrio de los ecosistemas y presentan toxicidad para los seres humanos. (8)

En este trabajo se llevó a cabo un estudio experimental con el objetivo de optimizar la extracción del AE de rizomas de *Hedychium coccineum* mediante HDAM. Para ello, se empleó una metodología de superficie de respuesta con un diseño de Box-Behnken, variando las condiciones de extracción (tiempo, potencia y relación sólido-líquido). Además, se realizó una comparación de la HDAM con métodos convencionales (hidrodestilación) y emergentes (ultrasonido como pretratamiento) en términos de rendimiento, propiedades físicas, perfil químico y consumo energético del AE obtenido. Por último, se evaluó la actividad repelente de los AE frente a gorgojos del género *Sitophilus* y la actividad antioxidante por el ensayo de eliminación de radicales DPPH.

## 2. Materiales y métodos:

### 2.1. Material vegetal

Los rizomas de *Hedychium coccineum* se colectaron en el campus principal de la Universidad del Quindío (4°33'13.6"N y 75°39'30.1"W), en la ciudad de Armenia, en el Departamento del Quindío, en la región centro-oeste de Colombia. Para la identificación taxonómica, un espécimen completo de la especie fue llevado al herbario de la Universidad del Quindío (HUQ) para ser analizado por un experto botánico. El material fue ingresado a la colección del herbario con el número de acceso 046622 confirmando así, la identidad taxo-

nómica de *Hedychium coccineum*. Los rizomas fueron sometidos a un secado en un horno de recirculación de aire marca DiEs, de la línea THERMOLAB, standard ASTM TH720, a una temperatura de 40 °C hasta peso constante. Posteriormente, se molieron en una licuadora marca Oster serie profesional y se pasaron por un tamiz número 10 con abertura de 2,0 mm.

### 2.2. Proceso de hidrodestilación asistida por microondas (HDAM)

El AE se obtuvo mediante un sistema de hidrodestilación asistida por microondas, utilizando un horno microondas convencional (General Electric, JES11G) con frecuencia de 60 Hz, potencia máxima de 1000 W y 10 niveles de intensidad. El equipo fue adaptado para la extracción realizando una abertura en la parte superior e instalando un condensador tipo Clevenger. En el interior del horno se colocó un matraz de fondo plano de 1 L con 40 g de muestra y agua destilada. La radiación del microondas generó calor, lo que provocó la evaporación del agua y su posterior condensación en el sistema Clevenger, produciendo un hidrolato que fue recolectado en matraces y extraído tres veces con volúmenes iguales de CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>. Posteriormente, el disolvente se eliminó en un evaporador rotatorio y el AE obtenido se secó con Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> anhidro. Finalmente, los aceites fueron pesados para calcular su porcentaje de rendimiento y almacenados en frascos ámbar a 4 °C. El rendimiento del AE se determinó según la Ec. (1).(9)

$$R(\%) = \frac{m_{AE}}{m_{MV}} * 100\% \quad (1)$$

Donde, R (%) es el rendimiento de AE, m<sub>AE</sub> (g) es la masa de AE obtenida y m<sub>MV</sub> (g) es la masa de polvo de rizomas de *Hedychium coccineum*.

### 2.3. Optimización del proceso HDAM mediante MSR y el diseño de Box Behnken.

Se aplicó un diseño Box-Behnken (DBB) con tres factores y tres niveles, complementado con un análisis de metodología superficie de respuesta (MSR), con el objetivo de optimizar el método de HDAM y maximizar el rendimiento del AE obtenido de los rizomas de *Hedychium coccineum* (Tabla 1). A partir de ensayos preliminares, se seleccionaron tres variables independientes: tiempo de irradiación en el microondas, potencia del microondas y relación sólido-líquido. Como variable de respuesta (Y) se definió el rendimiento del AE.

**Tabla 1.** Variables independientes y sus niveles para el diseño Box-Behnken

Código	Factor	Nivel		
		-1	0	+1
A	Tiempo del microondas (min)	30	40	50
B	Potencia del microondas (W)	400	600	800
C	Relación sólido-líquido (g/mL)	(1:10) 400 mL	(1:11) 440 mL	(1:12) 480 mL

Se llevaron a cabo 15 combinaciones experimentales de forma aleatoria, incluyendo tres puntos centrales (PC), empleando el software **Design Expert**, versión 13. Los rendimientos de extracción del AE se ajustaron a un modelo polinómico completo de segundo orden, establecido de la siguiente manera.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i \chi_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} \chi_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} \chi_i \chi_j \quad (2)$$

Donde Y es la respuesta prevista,  $X_i$  y  $X_j$  son las variables independientes,  $\beta_0$  es el coeficiente constante y  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  y  $\beta_{ij}$  son los coeficientes de los efectos lineal, cuadrático y de interacción, respectivamente.

#### 2.4. Hidrodestilación asistida por microondas con pretratamiento de ultrasonido (US+HDAM).

El material vegetal, en conjunto con el disolvente, fue sometido a un pretratamiento por ultrasonido utilizando un baño ultrasónico Bransonic, serie CPC1800H. Este equipo opera a una frecuencia de 45 kHz y una potencia fija de 70 W. El procedimiento se llevó a cabo a temperatura ambiente durante 30 minutos. Posteriormente, se realizó la extracción del AE mediante HDAM, empleando los parámetros previamente optimizados. Finalmente, se determinó el porcentaje de rendimiento de los AE obtenidos y se almacenaron en frascos ámbar a 4 °C.

#### 2.5. Hidrodestilación (HD)

Se emplearon 40 g de material vegetal para la extracción por utilizando un condensador tipo Clevenger durante 2 horas. Los AE obtenidos fueron deshidratados con  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  anhidro, posteriormente se pesaron para calcular su porcentaje de rendimiento y se almacenaron en frascos ámbar a 4 °C.

#### 2.6. Análisis fisicoquímico de los aceites esenciales

Los AE extraídos se analizaron para determinar el índice de refracción y la densidad relativa (gravedad específica), con los métodos a continuación descritos basados en las indicaciones de métodos oficiales de análisis para aceites y grasas de la AOAC 2000. (10)

##### 2.6.1. Índice de refracción

Para medir el índice de refracción del aceite, se utilizó un refractómetro Mettler Toledo según el método 921.08 AOAC (2000).

##### 2.6.2. Densidad relativa:

Se evaluó según el método 985.19 AOAC (2000) utilizando un picnómetro de 1 mL.

#### 2.7. Impacto ambiental de la HDAM, US+HDAM e HD

El impacto ambiental, evaluado a partir de la cantidad de emisiones de  $\text{CO}_2$  liberadas a la atmósfera y del consumo eléctrico, se determinó siguiendo lo reportado en la literatura. (11,12) Para estimar el consumo eléctrico (W) en los diferentes métodos HDAM, US+HDAM y HD se aplicó la siguiente ecuación:

$$W = P * t \quad (3)$$

Donde W es el consumo eléctrico (kWh), P es la potencia eléctrica (kW) y t es el tiempo (h).

De acuerdo con Drinić *et al.* (2021), la generación de 1 kWh de energía a partir de carbón o combustibles fósiles produce la emisión de aproximadamente 800 g de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera durante su combustión. La liberación de  $\text{CO}_2$  puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$E = \frac{W * 800}{1000} \quad (4)$$

Donde E es la emisión de  $\text{CO}_2$  (kg) y W es el consumo eléctrico (kWh).

#### 2.8. Análisis de componentes de aceites esenciales

Los AE fueron analizados mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM) en un equipo SHIMADZU, serie QP2010 Ultra. El método empleó helio como gas portador, con un flujo de 1 mL/min. Las muestras se prepararon en una dilución 1:20 v/v con diclorometano, inyectando 1  $\mu\text{L}$  en modo *split*. Se utilizó una columna Zebron ZB-5MS (5% fenilpoli-

siloxano – 95% dimetilpolisiloxano, 30 m × 0.25 mm ID × 0.25 µm df). Las temperaturas se fijaron en 40 °C para la columna, 300 °C para el inyector y 300 °C para la línea de transferencia. El programa de calentamiento consistió en mantener la columna a 40 °C durante 2 min, incrementar a 260 °C a razón de 5 °C/min y finalmente elevar a 310 °C con una rampa de 20 °C/min, manteniendo esta última temperatura constante. El espectrómetro de masas operó con ionización por impacto electrónico a 70 eV en modo *scan*, con un rango de análisis de m/z 40 a 450. La identificación de los componentes de los AE se realizó mediante la comparación de los tiempos de retención y los espectros de masas con la biblioteca NIST 2013 del equipo.

## 2.9. Actividad repelente de los AE sobre gorgojos del género *Sitophilus*

Los ejemplares del género *Sitophilus* fueron obtenidos a partir de arroz y otros cereales infestados, recolectados en el mercado local del municipio de Armenia. Posteriormente, se establecieron en un medio de cultivo compuesto por granos de arroz previamente esterilizados, contenidos en frascos de vidrio. Estos recipientes se cubrieron con tela de muselina para permitir una adecuada ventilación. Se permitió la oviposición durante un periodo de siete días, tras el cual se retiraron todos los adultos. A partir de ese momento, se realizó un seguimiento de los insectos emergentes durante 25 días, y se seleccionaron los adultos con edades entre 10 y 14 días para su uso en los bioensayos. Durante todo el proceso, el cultivo se mantuvo bajo condiciones ambientales naturales, tal como se indica. (14)

La capacidad repelente del AE extraído de rizomas de *Hedychium coccineum* fue evaluada en adultos de *Sitophilus* mediante el método de preferencia de área previamente descrito. (15) En términos generales, el ensayo se llevó a cabo en una caja de Petri de 9 cm de diámetro, utilizada como cámara de confinamiento para los insectos. El fondo de la placa fue cubierto con un papel de filtro del mismo tamaño, dividido en dos secciones iguales: una tratada con AE y la otra con acetona, que funcionó como control. Cada sección del papel de filtro recibió 500 µL de AE en distintas concentraciones (0,063; 0,126; 0,251; 0,503 y 1,0 µL/cm<sup>2</sup>), obtenidas al diluir volúmenes específicos de AE puro (2, 4, 8, 16 y 32 µL) en acetona, manteniendo el mismo volumen que en el control. Posteriormente, ambos lados del papel se dejaron secar al aire durante un minuto para asegurar la completa evaporación del disolvente. Se colocaron diez gorgojos adultos en el centro del papel de filtro y

se cubrió la placa de Petri para iniciar el ensayo. Cada concentración del tratamiento y su respectivo control se replicaron tres veces. El número de insectos presentes en cada mitad de la placa fue registrado a los 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas desde el inicio del experimento, y se calculó el porcentaje de repelencia (RP) del AE para cada intervalo temporal utilizando la ecuación 5.

$$P_R = \frac{N_C - N_T}{N_C + N_T} * 100\% \quad (5)$$

Donde PR indica el porcentaje de repelencia, mientras que N<sub>C</sub> y N<sub>T</sub> representa el número medio de insectos presentes en las regiones de control y tratadas respectivamente.

## 2.10. Ensayo de actividad de eliminación de radicales DPPH

La capacidad antioxidante de los AE se evaluó mediante el radical DPPH, siguiendo la metodología propuesta por Ray et al. (2018), con algunas modificaciones. (16) Para ello, se preparó una solución de DPPH en metanol a una concentración de 0,1 mM. La reacción se llevó a cabo mezclando 100 µL de esta solución con 100 µL de la muestra, en un rango de concentraciones entre 3,50 y 50 mg/mL. La mezcla se agitó y se mantuvo en oscuridad, a temperatura ambiente, durante 30 minutos. Posteriormente, la absorbancia se midió a 517 nm empleando un lector de microplacas. Una disminución en la absorbancia indicó una mayor capacidad del AE para neutralizar radicales libres. Como control positivo se utilizó ácido gálico. Los resultados se expresaron en términos de IC<sub>50</sub>, definido como la concentración del AE necesaria para inhibir el 50 % de la actividad radicalaria, y el porcentaje de eliminación de DPPH se calculó aplicando la Ecuación 6.

$$Eliminación\ de\ DPPH(\%) = \frac{A_0 - A_M}{A_C} * 100\% \quad (6)$$

Donde A<sub>0</sub> es la absorbancia de la reacción control y A<sub>M</sub> es la absorbancia de la muestra, el experimento se llevó a cabo por triplicado.

## 2.11. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó utilizando el software Design Expert versión 13 para obtener los valores óptimos experimentales y del modelo. Los datos resultantes de las extracciones por HDAM, US+HDAM e HD se expresaron como rendimiento medio ± desviación estándar. Se aplicaron análisis de varianza (ANOVA) y comparaciones múltiples (Tukey) para evaluar las diferencias de rendimiento en la extracción. Un *p*-valor

inferior a 0,05 se consideró estadísticamente significativo.

### 3. Resultados

#### 3.1. Optimización con metodología de superficie de respuesta

Los efectos individuales y de interacciones de las tres variables independientes estudiadas, incluido el tiempo de extracción de microondas, el poder de irradiación de microondas y la relación sólido-líquido, fueron optimizadas por el DBB, con el rendimiento del AE como la variable respuestas. La **Tabla 2** muestra la matriz de diseño con cada variable independiente en los tres niveles (+1, 0 y -1), las respuestas reales del rendimiento del AE en HDAM y los valores predichos obtenidos a través de DBB. El análisis de varianza y las estadísticas de ajuste se muestran en la **Tabla 3**. Los datos de los 15 experimentos se sometieron a un análisis de regresión polinómica de segundo orden, y el modelo polinómico obtenido se muestra a continuación:

$$Y = 0.2285 + 0.0290A + 0.0064B + 0.0043C - 0.0118AB - 0.0033AC - 0.0100BC - 0.0330A^2 - 0.0470B^2 - 0.0200C^2$$

**Tabla 2.** Diseño de Box-Behnken con valores experimentales y valores previstos para el rendimiento de los aceites esenciales.

Exp	Factor A	Factor B	Factor C	Variable respuesta	
	Tiempo microondas (min)	Potencia microondas (W)	Volumen de disolvente (mL)	Predicho	Experimental
4	50	800	440	0.1722	0.1723%
2	50	400	440	0.1829	0.1823%
12	40	800	480	0.1623	0.1596%
8	50	600	480	0.2055	0.2082%
13 <sup>PC</sup>	40	600	440	0.2285	0.2286%
15 <sup>PC</sup>	40	600	440	0.2285	0.2325%
14 <sup>PC</sup>	40	600	440	0.2285	0.2245%
1	30	400	440	0.1013	0.1012%
10	40	800	400	0.1737	0.1756%
5	30	600	400	0.1389	0.1363%
11	40	400	480	0.1694	0.1675%
9	40	400	400	0.1409	0.1436%
7	30	600	480	0.1541	0.1562%
3	30	800	440	0.1377	0.1384%
6	50	600	400	0.2034	0.2014%

<sup>PC</sup> puntos centrales en el diseño experimental

##### 3.1.1. Ajuste de los modelos de predicción

Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para examinar los modelos polinómicos y la relación entre la variable dependiente y los factores independientes. El valor p del modelo fue <0.0001. El valor p asociado a la falta de ajuste fue de 0.5476 ( $p > 0.05$ ). La precisión del coeficiente de variación (C.V.) fue 2.25 % y la precisión adecuada alcanzó un valor de 39.46. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue 0.9962, mientras que el valor ajustado de  $R^2$  ( $R^2_{adj}$ ) fue 0.9893.

**Tabla 3.** ANOVA para el modelo cuadrático de superficie de respuesta y estadísticas de ajuste para los valores de respuesta.

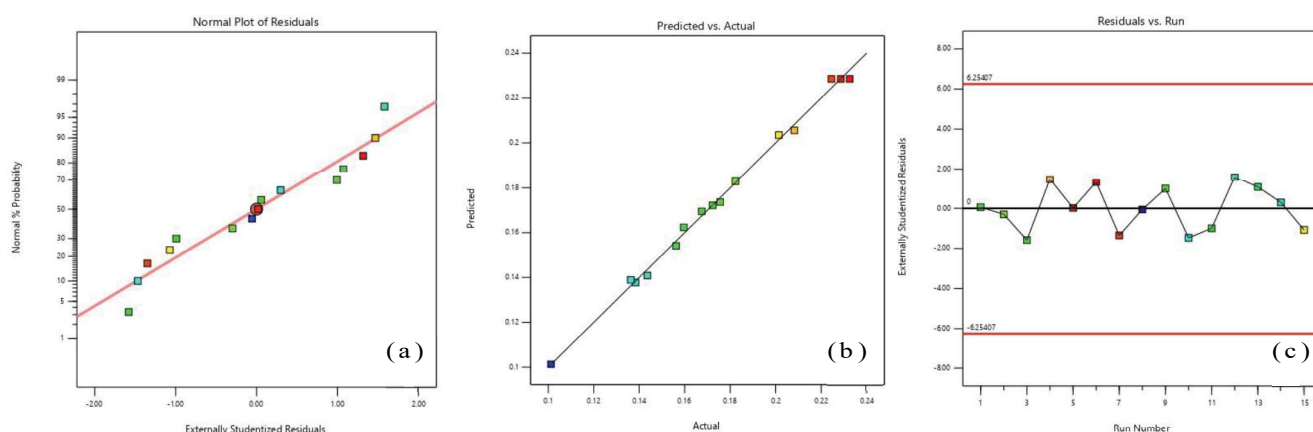
Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Modelo	0.0203	9	0.0023	144.9	< 0.0001*
A: Tiempo	0.0067	1	0.0067	431.99	< 0.0001*
B: Potencia	0.0003	1	0.0003	21.1	0.0059*
C: Volumen	0.0001	1	0.0001	9.6	0.0269*
AB	0.0006	1	0.0006	35.73	0.0019*
AC	0	1	0	2.75	0.158
BC	0.0004	1	0.0004	25.53	0.0039*
A <sup>2</sup>	0.004	1	0.004	258.21	< 0.0001*
B <sup>2</sup>	0.0081	1	0.0081	522.51	< 0.0001*
C <sup>2</sup>	0.0015	1	0.0015	94.67	0.0002*
Residual	0.0001	5	0		
Falta de ajuste	0	3	0	0.9567	0.5476
Error puro	0	2	0		
Total (corr.)	0.0204	14			
R <sup>2</sup>					0.9962
R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>					0.9893
R <sup>2</sup> <sub>pred</sub>					0.9605
% C.V					2.25
Precisión adecuada					39.46

\* p < 0.05, significativo

Además, para evaluar la importancia de cada variable en el proceso de extracción, se utilizaron valores  $p < 0,05$  indicando que los términos del modelo son significativos. Como se ilustra en **Tabla 3**, se estima que siete factores de nueve, incluidos los tres términos lineales A, B y C, junto con los tres términos cuadráticos A<sup>2</sup>, B<sup>2</sup> y C<sup>2</sup>, el término de interacción BC, demostraron tener un efecto significativo en el rendimiento del AE.

### 3.1.2. Diagnóstico de la adecuación del modelo

Se realizó una evaluación comparativa entre los valores estimados y observados, junto con el análisis de los residuos externos y los gráficos de probabilidad normal, en el marco de las transformaciones de potencia aplicadas para ajustar el modelo. En la **figura 1a** se observa que los datos experimentales se distribuyen principalmente a lo largo de una línea recta en el gráfico de probabilidad normal de los residuos, lo que indica una adecuada correspondencia con la distribución normal. La **figura 1b** representa la relación entre los valores predichos y los observados en el rendimiento del AE, mostrando que la mayoría de los puntos se alinean sobre una línea recta, lo cual refleja una fuerte concordancia entre los datos reales y los generados por el modelo. Por su parte, la **figura 1c** presenta la dispersión de los residuos externos, cuyos valores se mantienen dentro del rango de  $\pm 2$ , lo que respalda la validez del ajuste realizado mediante el modelo BBD. Estos resultados confirman que el modelo de optimización posee una elevada capacidad de ajuste y predicción, lo que lo convierte en una herramienta confiable para representar el comportamiento del sistema bajo estudio.



**Figura 1.** gráficos de diagnóstico para la adecuación del modelo incluyen la probabilidad normal (a), los valores previstos frente a los valores reales (b) y los residuos estudiados externamente (c).

### 3.1.3. Condiciones óptimas y validación de los modelos.

Para conseguir un proceso de extracción eficiente, factible y que a la vez reduzca el consumo de energía, en este estudio se emplearon la MSR junto al DBB para optimizar las condiciones de extracción por HDAM para garantizar los máximos rendimientos de AE de los rizomas de *H. coccineum*. Sobre la base del modelo establecido, los parámetros óptimos para el proceso de HDAM, que incluyen el tiempo de extracción de microondas, el poder de irradiación de microondas y la relación sólido-líquido, además de los rendimientos predichos y los rendimientos verificados con las condiciones óptimas, se muestran en la **Tabla 4**. Los resultados muy similares entre el rendimiento real y el rendimiento predicho sugieren que el DBB es confiable.

**Tabla 4.** Condiciones óptimas para la extracción de los AE de los rizomas de *Hedychium coccineum*.

Condiciones optimas			Rendimiento	
Tiempo (min)	Potencia (W)	Volumen (mL)	% Predicho	% Real
50	600	440	0.2250	0.2219

### 3.1.4. Análisis de las superficies de respuesta

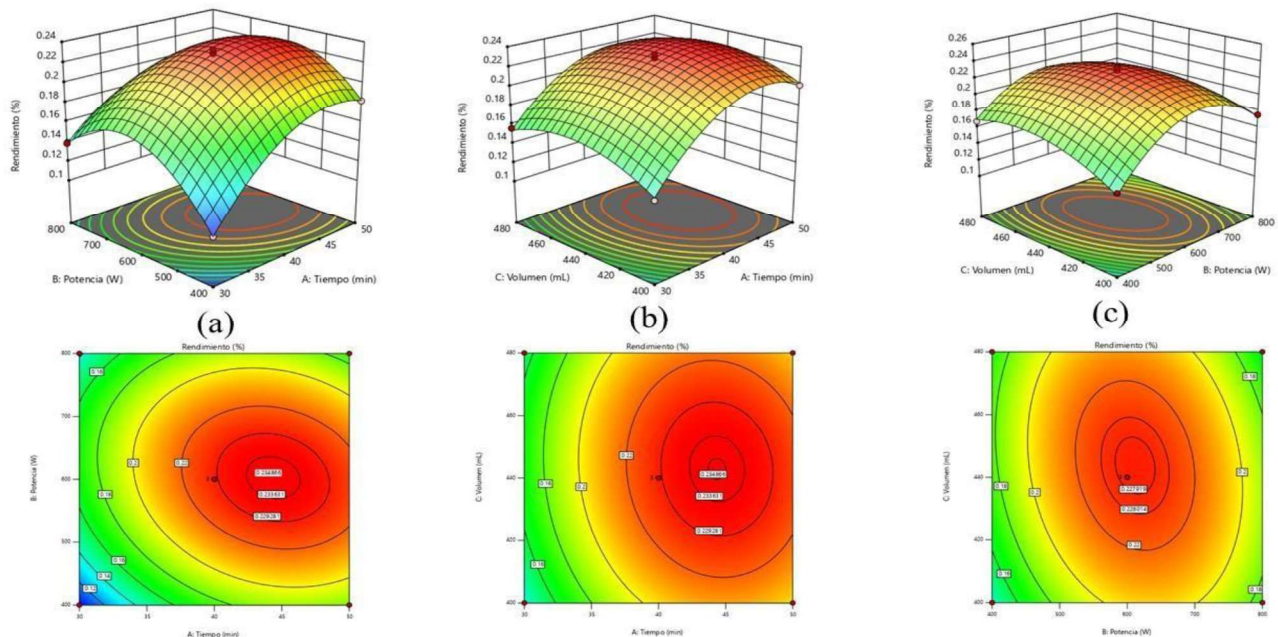
En la **Figura 2**, se ilustra cómo el rendimiento del AE extraído de los rizomas de *H. coccineum* se ve influenciado por los tres factores: tiempo de la extracción, potencia del microondas y la relación sólido-líquido. Para ello, se emplearon superficies de respuesta tridimensionales (3D) y mapas bidimensionales de contornos (2D), que permitieron explorar visualmente las interacciones entre variables. Cada superficie se construyó graficando la variable de respuesta en el eje Z frente a dos variables independientes en los ejes X e Y, mientras se mantenía constante la tercera en su valor medio. Estas representaciones gráficas facilitan la interpretación de la ecuación de regresión, revelando con mayor claridad cómo cada parámetro experimental afecta el rendimiento del AE, así como las posibles sinergias entre pares de variables. En cuanto a los mapas de contorno, la presencia de formas elípticas sugiere que existen interacciones significativas entre los factores analizados. En contraste, los contornos circulares indican que dichas interacciones son mínimas o inexistentes. (17)

La **Figura 2 (a)** muestra cómo varían los rendimientos del AE en función del tiempo y la potencia aplicada durante la irradiación por microondas. La forma elíptica del gráfico de contorno indica que ambos factores ejercen una influencia significativa sobre el proceso de extracción. Según la superficie de respuesta, el rendimiento del AE tiende a incrementarse de manera continua conforme se elevan tanto el tiempo como la potencia, alcanzando un valor máximo de 0.235% bajo condiciones óptimas de 44.36 minutos y 600 W. Sin embargo, aumentar el tiempo y la potencia de irradiación con respecto al valor óptima conduce a una disminución en la eficiencia de extracción.

La **Figura 2 (b)** ilustra la variabilidad del rendimiento con respecto a la relación entre el tiempo de irradiación por microondas y la proporción sólido-líquido. Se observa que el rendimiento mejora progresivamente al incrementar

el tiempo de irradiación, ya que un tiempo superior a 37 min generan los máximos rendimiento de extracción, en cuanto a la variación en el volumen tanto la superficie 3D como los contornos 2D no relacionan cambios apreciables en términos del rendimiento. La interacción de estos dos factores alcanza un valor máximo de 0.235 % bajo condiciones óptimas de 44.36 minutos y un volumen de 443 mL de agua, correspondiente a una relación sólido-líquido de 1:11. El mapa de contorno 2D sugiere que ambos factores tienen un impacto mínimo sobre el rendimiento, por la forma circular que representa su interacción.

**La Figura 2 (c)** enseña la relación que existe entre la potencia de microondas y la relación sólido-líquido encontrando un efecto significativo en la interacción de ambos factores. El rendimiento de extracción mejora considerablemente al aumentar ambos factores hasta las condiciones óptimas que fueron de 600 W y 443 mL para la potencia y la relación solidoliquido respectivamente con un rendimiento máximo de 0.228%. Al igual que con las relaciones entre el tiempo y la potencia, en este caso al aumentar tanto la potencia como la relación solidoliquido se observa una disminución en el rendimiento. La forma elíptica del contorno 2D sugiere que la interacción de los factores evaluados es significativa y genera cambios en el rendimiento de extracción.



**Figura 2.** Gráficos de superficie de respuesta en 3D y mapas de contorno en 2D, (a) interacción entre el tiempo de microondas y la potencia de microondas, (b) interacción entre el tiempo de microondas y la relación sólido-líquido y (c) interacción entre la potencia de microondas y la relación sólido-líquido.

### 3.2. Comparación de los diferentes métodos de extracción HDAM, US+HDAM e HD

En este estudio, se llevó a cabo una comparación entre tres métodos de extracción de AE la HDAM, US+HDAM y HD. La evaluación se basó en parámetros como el tiempo de extracción, el rendimiento obtenido, el consumo energético, propiedades fisicoquímicas y la composición química del AE. Para ello, se realizaron experimentos adicionales que permitieron analizar el efecto del pretratamiento ultrasónico. Asimismo, la extracción mediante HDAM se ejecutó bajo las condiciones óptimas determinadas previamente por DBB. En el caso de la hidrodestilación convencional, el procedimiento se adaptó según lo reportado en la literatura, introduciendo una modificación específica en el tiempo de extracción para fines comparativos (2h). (4)

#### 3.2.1. Tiempo y rendimiento de extracción

De acuerdo con los datos presentados en la **Tabla 5**, el método combinado US+HDAM produjo los rendimientos más altos de AE, superando significativamente a los obtenidos mediante HDAM y HD. Este resultado fue respaldado por el análisis de varianza, el cual indicó diferencias estadísticamente significativas en las tasas de extracción entre los distintos métodos evaluados ( $p = 0,000$ ). El tiempo total requerido para cada extracción fue de 120 min para HD, 80 min para US+HDAM y 50 min para HDAM.

**Tabla 5.** Rendimiento, propiedades físicas e impacto ambiental del aceite esencial de rizomas de *Hedychium coccineum* obtenido por HDAM, US+HDAM e HD.

	HDAM	US+HDAM	HD
Tiempo total de extracción (min)	50	80	120
Color	Amarillo traslucido		
Aroma	Amaderado ligeramente alcanforado		
Rendimiento (%)	0.2219	0.3045	0.1846
Densidad (g/mL)	0.918	0.911	0.923
Índice refracción (D)	1.484	1.487	1.481
Consumo eléctrico (kWh)	0.500	0.535	2.2
Emisiones de CO <sub>2</sub> (kg)	0.400	0.428	1.76

### 3.2.2. Propiedades físicas de los aceites

Los AE extraídos de rizomas de *Hedychium coccineum* mediante HD, HDAM y US+HDAM fueron evaluados en cuanto a sus propiedades físicas, incluyendo densidad e índice de refracción, así como a través de un análisis sensorial que consideró el color y aroma. Los resultados indicaron que no se produjeron diferencias significativas entre los métodos, lo que sugiere que las técnicas de extracción empleadas no alteran de forma notable las características físicas del AE **Tabla 5**.

### 3.2.3. Consumo de electricidad e impacto medioambiental (emisión de CO<sub>2</sub>)

Además de mejorar el rendimiento y reducir el tiempo de extracción, los métodos innovadores HDAM y US+HDAM sobresalen por su eficiencia energética y menor impacto ambiental. Para respaldar esta afirmación, se llevó a cabo una comparación entre el consumo eléctrico y las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por estos métodos frente al procedimiento tradicional HD. **La Tabla 5** presenta los valores correspondientes de consumo energético (W) y emisión de CO<sub>2</sub> (E) asociados a la obtención de AE mediante cada técnica evaluada. El consumo eléctrico estimado fue de 0.500 kWh (HDAM), 0.535 kWh (US+HDAM) y 2.2 kWh (HD). A partir de estos valores, las emisiones de CO<sub>2</sub> calculadas correspondieron a 0.400 kg, 0.428 kg y 1.76 kg, respectivamente.

### 3.2.4. Análisis de componentes de aceites esenciales

El uso de las técnicas emergente como la extracción por microondas y ultrasonido, de forma independiente o en combinación podrían modificar la composición química de los AE, debido a que son técnicas que aún se están explorando en diversas matrices vegetales. Con propósito de valorar la posible modificación, se evaluó mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM) la influencia de las tres técnicas de extracción en la composición química del AE de *H. coccineum*. Los resultados evidenciaron que, aunque la composición global de los AE obtenidos con cada método fue muy similar, se observaron variaciones leves en la concentración de algunos compuestos. El análisis cromatográfico permitió identificar 32 constituyentes comunes en los aceites extraídos por las tres metodologías, cuyos datos se presentan en la **Tabla 6**. Tanto el ultrasonido como la microondas demostraron ser eficaces para agilizar la extracción y aumentar el rendimiento, sin ocasionar alteraciones significativas en la composición química.

**Tabla 6.** Composición química de aceites esenciales de *Elettaria cardamomum* obtenidos mediante diferentes técnicas.

Pico	Tiempo R	Nombre Compuesto	Porcentaje de área relativa (%)		
			HD	HDAM	US+HDAM
1	11,921	Limoneno	0.15±0.006	0.10±0.000	0.08±0.006
2	16,286	β-linalool	29.26±1.354	27.45±0.360	28.54±0.051
3	19,620	Citronelal	0.26±0.0131	2.93±0.112	2.68±0.138
4	20,064	Citronelol	0.32±0.006	0.23±0.012	0.21±0.015
5	20,642	Endo-Borneol	0.86±0.045	1.23±0.046	1.14±0.032
6	22,103	α-terpineol	0.27±0.006	0.11±0.006	0.11±0.006

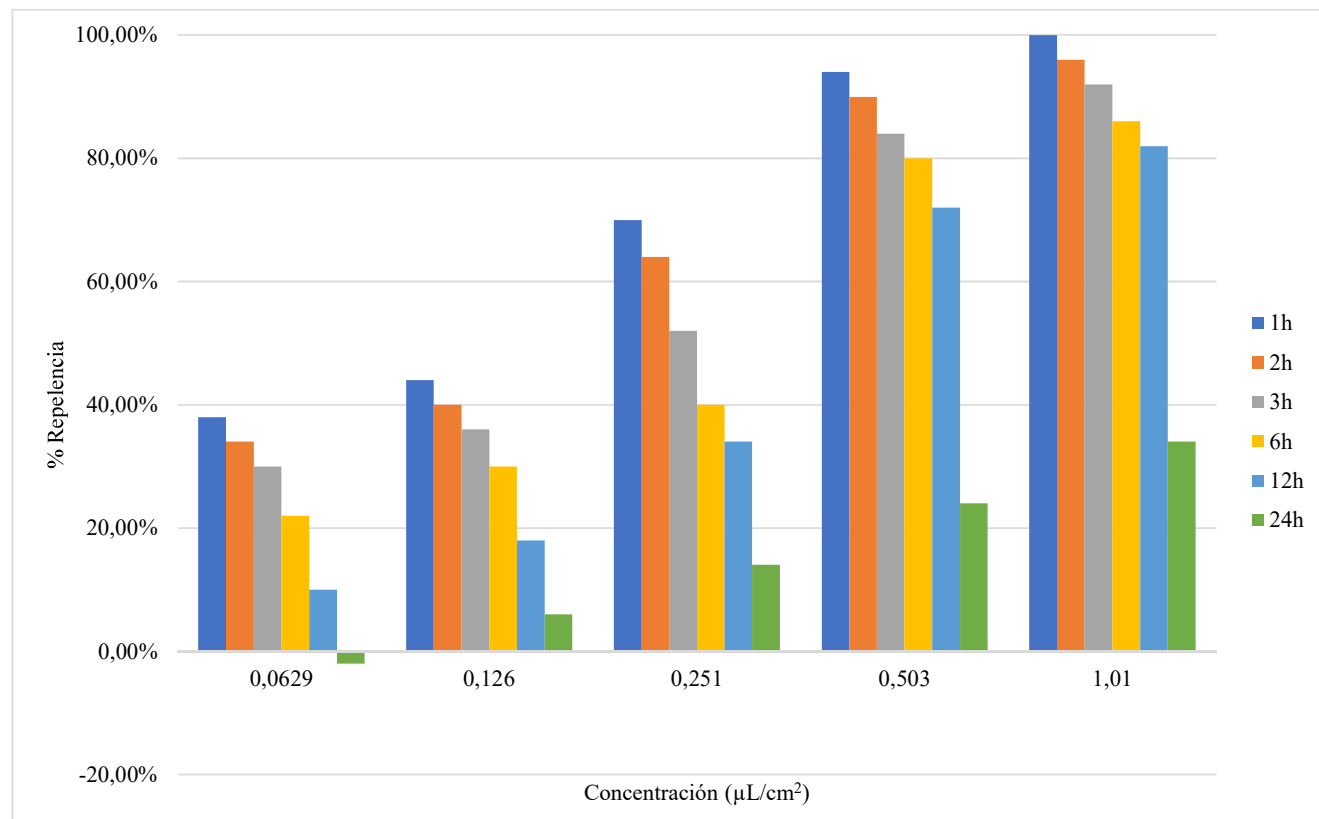
7	26,609	Acetato de bornilo	12.88±1.452	10.25±0.065	11.47±1.202
8	26,899	$\gamma$ -elemeno	0.58±0.025	0.39±0.035	0.44±0.065
9	30,563	$\beta$ -elemeno	0.17±0.005	0.37±0.236	0.49±0.283
10	32,397	$\alpha$ -ilangeno	0.12±0.006	0.24±0.006	0.25±0.010
11	32,566	Cariofileno	0.47±0.010	0.87±0.012	0.91±0.010
12	37,069	Germacreno D	2.90±0.010	2.11±0.000	2.31±0.021
13	37,450	$\alpha$ -curcumeno	3.38±0.006	3.17±0.010	3.47±0.000
14	38,159	Germacreno B	1.54±0.026	1.95±0.055	2.01±0.108
15	39,535	$\delta$ -cadineno	0.61±0.000	0.80±0.000	0.70±0.006
16	41,712	Hidrato de 7-epi-trans-Sesquisabinene	0.44±0.000	0.31±0.000	0.41±0.000
17	42,234	<i>E</i> -Nerolidol	20.14±0.012	21.45±0.010	20.74±0.040
18	44,909	Globulol	1.14±0.010	1.17±0.044	1.25±0.040
19	45,326	Espatulenol	6.73±0.17	9.66±0.017	4.82±0.052
20	46,099	Epóxido de bisaboleno	0.77±0.000	0.80±0.012	0.68±0.006
21	46,936	Bisaboleno	0.49±0.011	0.49±0.058	0.27±0.167
22	47,578	Oxido de cariofileno	0.42±0.006	0.47±0.021	0.58±0.006
23	49,069	Andrografólido	2.38±0.006	2.64±0.010	3.05±0.006
24	49,890	$\alpha$ -cadinol	1.09±0.006	1.17±0.006	1.06±0.000
25	50,983	Acetato de nerolidilo	0.33±0.670	34.93±0.447	35.70±0.046
26	51,222	Ledeno	0.55±0.006	0.48±0.012	0.57±0.010
27	54,526	Ledol	0.42±0.000	0.36±0.006	0.36±0.015
28	55,945	Artemisia cetona	11.74±0.010	14.30±0.010	13.41±0.010
29	56,345	diepoxido a-limoneno	0.55±0.000	0.50±0.000	0.52±0.006
30	60,746	Viridiflorol	0.71±0.036	0.78±0.021	0.77±0.026
31	67,215	<i>E</i> -geranil linalool	0.58±0.025	0.60±0.006	0.56±0.010
32	69,647		0.46±0.010	0.40±0.006	0.39±0.010

Los compuestos mayoritarios identificados en los AE extraídos del rizoma de *Hedychium coccineum* fueron linalool, (E)-nerolidol, acetato de bornilo, artemisia cetona y espatulenol, con proporciones que oscilaron entre el 6 % y el 29 %. El linalool fue el componente más abundante en los tres métodos de extracción, con valores de 29,26 % en HD, 27,45 % en HDAM y 28,54 % en US+HDAM. Así mismo, le siguió el E-nerolidol, con concentraciones de 20,14 %, 20,74 % y 21,45 %, respectivamente. Por otro lado, el acetato de bornilo también presentó porcentajes significativos en los tres métodos, superando en todos los casos el 10 %. En cuanto a la artemisia cetona, este compuesto mostró un contenido elevado particularmente en HDAM (14,30 %) y US+HDAM (13,41 %), lo que indica una contribución relevante al perfil químico del AE obtenido en este estudio. Finalmente, el espatulenol fue detectado en todas las muestras, siendo más abundante en HDAM (9,66 %), seguido de HD (6,73 %) y US+HDAM (4,82 %).

### 3.3. Efecto repelente del aceite esencial contra especies del género *Sitophilus*

En la **Figura 3** se observa la acción repelente del AE de *Hedychium coccineum* sobre gorgojo adultos del género *Sitophilus*. El nivel de repelencia estuvo estrechamente asociado tanto con la dosis aplicada como con el tiempo de exposición. Los resultados indican que los insectos evitaron permanecer en las superficies tratadas con el AE, prefiriendo el área de control, lo que originó porcentajes de repelencia cercanos al 100% en concentraciones de 0.503  $\mu\text{L}/\text{cm}^2$  y 1.0  $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ , siendo estas efectiva incluso hasta las 12 horas de aplicación de los AE. No obstante, tal como se había señalado previamente, la capacidad repelente del AE disminuyó de forma progresiva cuando la

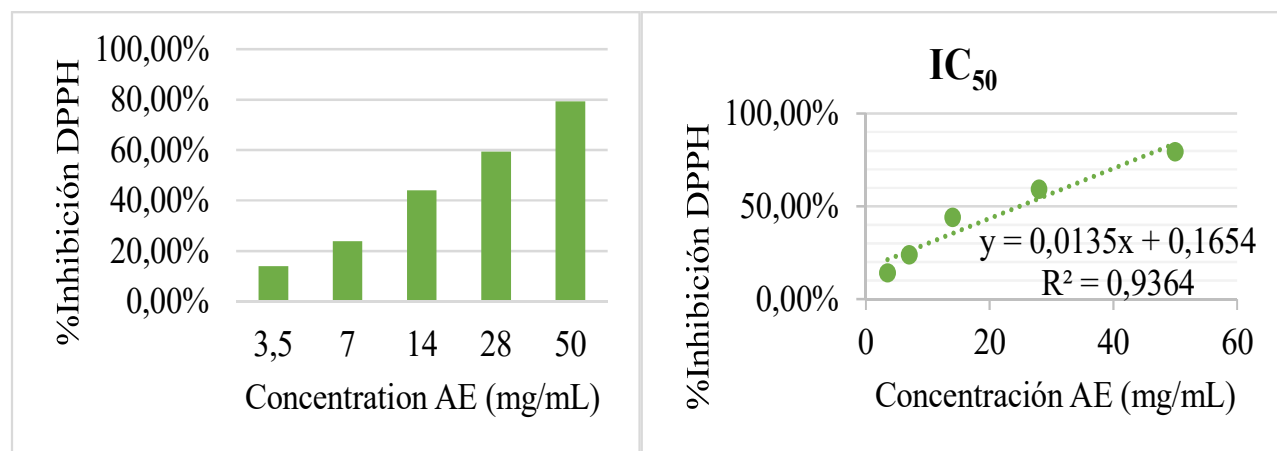
concentración se redujo o cuando la exposición se prolongó más allá de las 12 horas. A las 24 horas, el efecto se redujo a valores inferiores al 34 %, incluso en la dosis más baja 0.063  $\mu\text{L}/\text{cm}^2$  la actividad repelente se perdió por completo.

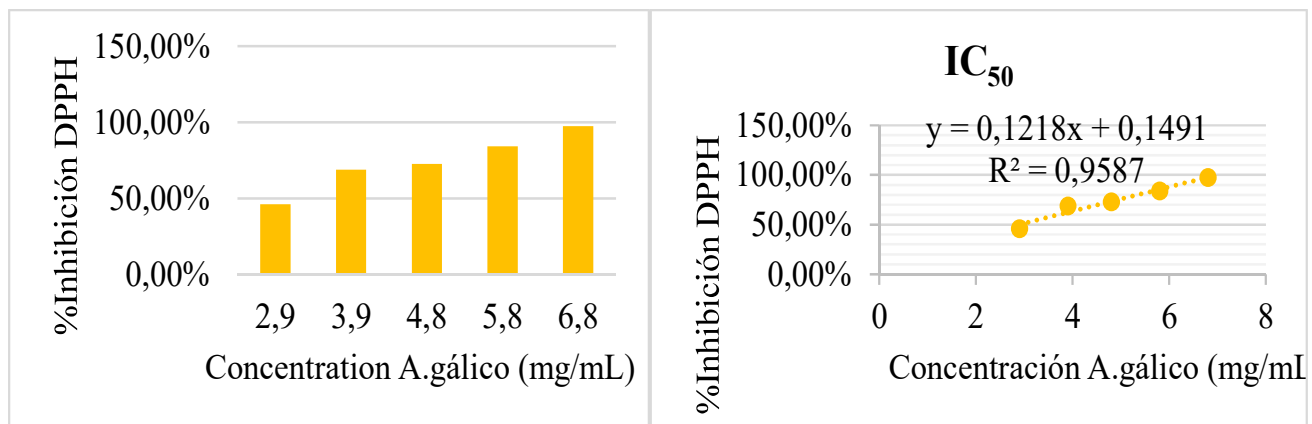


**Figura 3.** Efectos de varias concentraciones de aceite esencial de *Hedychium coccineum* sobre la actividad repelente contra adultos de *Sitophilus* después de diferentes tiempos de incubación.

### 3.4. Actividad antioxidante DPPH

La evaluación del potencial antioxidante del AE extraído de los rizomas de *Hedychium coccineum* se llevó a cabo usando el ensayo DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo). Este método es muy utilizado en análisis químicos por ser sencillo, sensible y reproducible. Los resultados mostraron que el AE presenta una inhibición creciente del radical DPPH a medida que aumenta la concentración, desde un 14,07 % a 3,5 mg/mL hasta un 79,40 % a 50 mg/mL. A partir de estos valores se construyó una curva dosis-respuesta, para el AE y para el control positivo **figura 4**, se calculó el valor de  $\text{IC}_{50}$ , definido como la concentración necesaria para inhibir el 50 % del radical libre. El  $\text{IC}_{50}$  del AE fue de 24,79 mg/mL, mientras que el ácido gálico presentó un  $\text{IC}_{50}$  de 2.27 mg/mL.





**Figura 4.** Porcentaje de inhibición del radical DPPH por el AE de rizomas de *Hedychium coccineum* y el ácido gálico a distintas concentraciones.

#### 4. Discusión

El análisis estadístico confirmó la robustez del modelo cuadrático propuesto para describir la extracción de AE mediante HDAM. El p-valor del modelo ( $<0.0001$ ) y el coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.9962$ ) evidencian que las variables consideradas explican de manera satisfactoria la variabilidad observada en los rendimientos. Además, el  $R^2$  ajustado (0.9893) y el  $R^2$  predicho (0.9605) mostraron una concordancia estrecha, lo cual respalda la validez del modelo y descarta la existencia de sobreajuste. En este mismo sentido, la prueba de falta de ajuste no resultó significativa ( $p = 0.5476$ ), lo que demuestra que el modelo describe adecuadamente los datos experimentales y no requiere ajustes. Otro aspecto relevante fue la baja variabilidad experimental (C.V. = 2.25%), lo cual refleja alta precisión en las mediciones y reproducibilidad del diseño experimental. Estos parámetros estadísticos se encuentran concordancia con los valores reportados en metodologías de optimización de procesos, lo que respalda la solidez de los resultados obtenidos. (18–20)

Los factores evaluados (tiempo, potencia y relación sólido-líquido) presentaron efectos significativos tanto en sus términos lineales como en la mayoría de los términos cuadráticos e interacciones. El tiempo de irradiación ( $p < 0.0001$ ) y la potencia del microondas ( $p = 0.0059$ ) fueron las variables más influyentes en el rendimiento, lo que coincide con estudios previos en especies de Zingiberaceae donde estos parámetros determinan la eficiencia de liberación de compuestos volátiles. (21–23) La relación sólido-líquido también resultó significativa ( $p = 0.0269$ ), aunque su efecto fue de menor magnitud en comparación con las otras dos variables. Las interacciones entre factores mostraron que la combinación

potencia–relación sólido-líquido (BC) ejerce un efecto estadísticamente significativo ( $p = 0.0039$ ), mientras que la interacción tiempo–relación sólido-líquido (AC) no alcanzó significancia ( $p = 0.158$ ). Esto sugiere que, aunque cada variable influye de manera independiente, existen sinergias importantes que deben considerarse para maximizar la eficiencia del proceso. De hecho, los gráficos de superficies de respuesta confirmaron que el incremento simultáneo de la potencia y la proporción de solvente genera un aumento en el rendimiento hasta un punto óptimo, a partir del cual se produce una disminución atribuible posiblemente a la degradación térmica de metabolitos volátiles o a la sobresaturación del medio. (24)

La comparación entre los tres métodos evaluados mostró que el US+HDAM produjo el mayor rendimiento de AE (0.3045 %), superando de forma significativa a los obtenidos mediante HDAM (0.2219 %) y la HD (0.1846 %). Estos resultados evidencian que la aplicación combinada de tecnologías emergentes puede potenciar la liberación de metabolitos volátiles al favorecer la disrupción de las paredes celulares, tal como ha sido descrito en otras especies vegetales. (25–27) En términos de eficiencia temporal, los métodos basados en microondas redujeron de manera importante el tiempo de extracción en comparación con la HD (120 min). La HDAM requirió únicamente 50 min, mientras que US+HDAM, aunque incluyó un pretratamiento adicional de 30 min, mantuvo un tiempo total inferior al convencional (80 min). La reducción en la duración del proceso es consistente con lo reportado en la literatura, donde se destaca la capacidad de estas tecnologías para acelerar la transferencia de masa y calor durante la extracción. (28–30)

Las propiedades físicas de los aceites obtenidos (densidad, índice de refracción, color y aroma) no mostraron diferencias notables entre los tres métodos. Esto sugiere que las condiciones de extracción aplicadas no alteraron las características organolépticas ni las propiedades fisicoquímicas básicas del producto final, lo que es relevante para asegurar la calidad del AE independiente de la técnica utilizada. Por otro lado, el análisis de consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub> evidenció una ventaja ambiental significativa de las tecnologías emergentes. La hidrodestilación convencional requirió 2.2 kWh y generó 1.76 kg de CO<sub>2</sub>, valores muy superiores a los observados en HDAM (0.500 kWh; 0.400 kg CO<sub>2</sub>) y US+HDAM (0.535 kWh; 0.428 kg CO<sub>2</sub>). Estos hallazgos concuerdan con estudios previos que señalan a las técnicas asistidas por microondas y ultrasonido como alternativas más sostenibles, al reducir el impacto ambiental y el consumo de recursos energéticos. (20,31)

La aplicación de ultrasonido y microondas en la extracción de AE permite obtener mayores rendimientos en menor tiempo, sin que esto implique modificaciones relevantes en su perfil químico. Este comportamiento coincide con lo reportado en estudios previos (32,33), en los que dichas metodologías también demostraron ser eficientes sin alterar significativamente la composición de los AE. De manera complementaria, los hallazgos guardan cierta concordancia con lo descrito por Arya et al. (2022), quienes señalaron como constituyentes principales del AE de *H. coccineum* originario de la India al acetato de bornilo (13,95%) y al (E)-nerolidol (15,9%), además de otros monoterpenos oxigenados y sesquiterpenos. (3) Por su parte, Tian et al. (2024) reportaron concentraciones elevadas de *E*-nerolidol (40,5%), acetato de borneol (24,8%), espatulenol (4,5%) y linalool (3,8%). (4) En conjunto, ambas investigaciones destacan el elevado potencial bioactivo del AE de *H. coccineum*, al atribuirle propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas, antifúngicas, insecticidas y nematocidas, lo que refuerza su valor como recurso fitoquímico con aplicaciones versátiles en el ámbito de la salud y en estrategias de control biológico de plagas.

Si bien el material vegetal empleado en este estudio fue sometido a un proceso de secado previo, los resultados obtenidos indican que este procedimiento no generó modificaciones sustanciales en la composición química del AE, particularmente en relación con los compuestos mayoritarios. Aunque la literatura señala que el secado puede favorecer la pérdida parcial de monoterpenos más volátiles, (34,35) en este caso se observó una alta

estabilidad en los constituyentes predominantes como linalool, (E)-nerolidol, acetato de bornilo, y espatulenol, cuyas proporciones se mantuvieron consistentes entre los distintos métodos de extracción evaluados y dentro de rangos comparables a estudios previos. Estos hallazgos sugieren que el secado a 40 °C preservó adecuadamente los metabolitos volátiles principales y que las variaciones respecto a otros reportes se explican más por factores ambientales o genéticos asociados a la procedencia del material, que por el tratamiento poscosecha del mismo.

Los resultados obtenidos demuestran que el AE de *Hedychium coccineum* presenta un marcado efecto repelente contra adultos del género *Sitophilus*, con una respuesta dependiente tanto de la concentración como del tiempo de exposición. La alta eficacia observada a concentraciones de 0.503 µL/cm<sup>2</sup> y 1.0 µL/cm<sup>2</sup>, que alcanzaron niveles cercanos al 100% de repelencia hasta las 12 horas, confirma su potencial como alternativa natural frente a plaguicidas convencionales. Sin embargo, la disminución progresiva de la actividad a tiempos prolongados, especialmente a las 24 horas, sugiere una volatilidad elevada de los compuestos activos del aceite, lo cual limita la duración del efecto repelente. Este comportamiento coincide con lo reportado para otros AE, donde la pérdida de eficacia en periodos prolongados suele estar asociada a la rápida evaporación o degradación de los metabolitos responsables de la bioactividad.

Si bien no se encontraron antecedentes directos sobre la acción de *H. coccineum* frente a *Sitophilus*, estudios recientes han mostrado efectos comparables en otras especies del mismo género. Por ejemplo, Wang et al. (2024) analizaron los AE de *Hedychium glabrum*, *H. coronarium* y *H. yunnanense* contra plagas de almacenamiento como *Tribolium castaneum*, *Lasioderma serricorne* y *Liposcelis bostrychophila*. Los resultados evidenciaron que todos los aceites presentaron una marcada actividad repelente, la cual dependía de la dosis aplicada. (36) Para *H. coccineum*, Arya et al. (2024) reportaron un perfil químico caracterizado por compuestos como espatulenol, *E*-nerolidol y acetato de bornilo, los cuales han sido asociados en diferentes estudios con propiedades repelentes y diversas actividades biológicas. (3) Estos hallazgos respaldan lo observado en este estudio, considerando que las especies evaluadas comparten composiciones químicas semejantes y mecanismos de acción vinculados con la alteración de los sistemas sensoriales de los insectos.

Entre los compuestos mayoritarios del AE de *H. coccineum* el linalool presentan actividad repelente frente a diversos insectos; no obstante, los mecanismos específicos responsables de dicha acción aún no están completamente esclarecidos. Se ha propuesto que los mono-terpenos interactúan con múltiples blancos moleculares tanto en insectos como en mamíferos, principalmente a nivel del sistema nervioso. Entre estas posibles dianas se incluyen los canales de cloruro regulados por GABA, los receptores de octopamina, tiramina y acetilcolina nicotínica (nAChR), así como la enzima acetilcolinesterasa, los canales de sodio y otros sitios neurofisiológicos relevantes. (37)

Los resultados obtenidos confirman que el AE de *H. coccineum* posee actividad antioxidante, aunque en menor medida que el ácido gálico utilizado como control. El valor de  $IC_{50}$  indica que se requiere una mayor concentración del aceite para alcanzar una inhibición del 50 % del radical DPPH, lo cual sugiere una eficacia moderada frente al estándar. Se ha documentado que las especies del género *Hedychium* presentan una capacidad antioxidante variable, influenciada por la parte de la planta analizada, el quimiotipo y las condiciones de extracción empleadas. (38) En el caso del aceite esencial de *Hedychium coccineum*, su actividad puede considerarse moderada al compararse con compuestos de referencia como el ácido gálico. Este hallazgo concuerda con lo reportado para otros AE de la familia Zingiberaceae, cuyos valores de  $IC_{50}$  se han situado entre 10 y 40 mg/mL en especies como *Cúrcuma longa*, *Hedychium spicatum* y *Zingiber officinale*. (3,39)

## 5. Conclusión

La optimización del proceso de extracción de AE de rizomas de *Hedychium coccineum* mediante HDAM, complementada con US, demostró ser una estrategia altamente eficiente y sostenible. El diseño experimental tipo Box-Behnken permitió identificar condiciones óptimas de extracción (50 min, 600 W, relación sólido-

do-líquido 1:11), alcanzando rendimientos superiores al 0.22 %, con alta reproducibilidad ( $R^2 = 0.9962$ ) y mínima variabilidad experimental (C.V. = 2.25 %). Comparativamente, el método US+HDAM superó significativamente en rendimiento (0.3045 %) y eficiencia energética (0.535 kWh, 0.428 kg CO<sub>2</sub>) a la hidrodestilación convencional, sin alterar de forma significativa las propiedades fisicoquímicas ni el perfil cromatográfico del AE. Se identificaron 32 compuestos, destacando el linalool, *E*-nerolidol, acetato de bornilo y artemisia cetona como constituyentes mayoritarios, con implicaciones funcionales en bioactividad.

Desde una perspectiva de bioactividad, el AE mostró actividad repelente dependiente de dosis y tiempo frente a *Sitophilus* spp., con eficacia superior al 90 % en concentraciones  $\geq 0.503 \mu\text{L}/\text{cm}^2$  durante las primeras 12 horas. Asimismo, presentó capacidad antioxidante moderada ( $IC_{50} = 24.79 \text{ mg/mL}$ ), atribuible a la presencia de sesquiterpenos oxigenados. Estos hallazgos consolidan el uso de tecnologías emergentes como herramientas clave en la valorización fitoquímica de especies de Zingiberaceae, con aplicaciones potenciales en biocontrol, cosmética funcional y desarrollo de ingredientes activos para formulaciones terapéuticas.

## 6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Universidad del Quindío, al Programa de Química y a la vicerrectoría de investigaciones por su apoyo financiero.

## 7. Declaración de intereses y financiación

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. Este trabajo de investigación fue financiado por la vicerrectoría de investigación de la Universidad del Quindío mediante el proyecto de investigación No.1198 a través de la convocatoria No14 para el fortalecimiento de los grupos de investigación.

## Referencias

1. Kumar V, Marković T, Emerald M, Dey A. Herbs: Composition and Dietary Importance. *Encycl. Food Health*. 2016 Jan 1;332–7. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00376-7>
2. Yit K-H, Zainal-Abidin Z. Antimicrobial Potential of Natural Compounds of Zingiberaceae Plants and their Synthetic Analogues: A Scoping Review of *In vitro* and *In silico* Approaches. *Curr Top Med Chem*. 2024 May 1;24(13):1158–84. <https://doi.org/10.2174/0115680266294573240328050629> PMID: 38584545
3. Arya S, Kumar R, Prakash O, Kumar S, Mahawer SK, Chamoli S, et al. Chemical Composition and Biological Activities of *Hedychium coccineum* Buch.-Ham. ex Sm. Essential Oils from Kumaun Hills of Uttarakhand. *Molecules*. 2022 Jul 28;27(15):4833. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27154833> PMID: 35956784
4. Tian M, Xie D, Hong Y, Ding F, Wu X, Tang D. Anti-inflammatory effects and related mechanisms *in vitro* and *in vivo* of *Hedychium coccineum* rhizome essential oil. *J Ethnopharmacol*. 2024 Jun 28;328:118103. <https://doi.org/10.1016/J.JEP.2024.118103> PMID: 38527573
5. Saldaña-Mendoza SA, Chávez-González ML, Ramírez-Guzmán N, Pacios-Michelena S, Aguilar CN. Technological trends in the extraction of essential oils. *Environ. Qual. Manag.* 2022 Sep 1;32(1):441–50. <https://doi.org/10.1002/TQEM.21882>
6. Kant R, Kumar A. Review on essential oil extraction from aromatic and medicinal plants: Techniques, performance and economic analysis. *Sustain Chem Pharm*. 2022 Dec 1;30:100829. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2022.100829>
7. More PR, Jambrak AR, Arya SS. Green, environment-friendly and sustainable techniques for extraction of food bioactive compounds and waste valorization. *Trends Food Sci. Technol.* 2022 Oct 1;128:296–315. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.08.016>
8. Jyotsna B, Patil S, Prakash YS, Rathnagiri P, Kavi Kishor PB, Jalaja N. Essential oils from plant resources as potent insecticides and repellents: Current status and future perspectives. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 2024 Oct 1;61:103395. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2024.103395>
9. Cano Botero JL, Ospina Balvuela Y, Gutiérrez Cifuentes JA, Sepúlveda Nieto M del P, Ríos Vásquez E. Optimization of a novel *Renealmia ligulata* (Zingiberaceae) essential oil extraction method through microwave-assisted hydrodistillation. *Univ Sci (Bogotá)*. 2024;29(2):108–25. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.SC292.ooan>
10. Horwitz W. AOAC OFFICIAL METHODS OF ANALYSIS (2000). 17th Ed. Vol. 41, AOAC INTERNATIONAL. 2000. <https://doi.org/10.1108/nfs.2011.01741eaa.022>
11. Drinić Z, Pljevljakušić D, Janković T, Zdunić G, Bigović D, Šavikin K. Hydro-distillation and microwave-assisted distillation of *Sideritis raeseri*: Comparison of the composition of the essential oil, hydrolat and residual water extract. *Sustain Chem Pharm*. 2021 Dec 1;24:100538. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2021.100538>
12. Chen Y, Xu F, Pang M, Jin X, Lv H, Li Z, et al. Microwave-assisted hydrodistillation extraction based on microwave-assisted preparation of deep eutectic solvents coupled with GC-MS for analysis of essential oils from clove buds. *Sustain Chem Pharm*. 2022 Jun 1;27:100695. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2022.100695>
13. Adams RP. Identification of essential oil components by gas chromatography/mass spectroscopy. 4th ed. Vol. 1. Allured Pub. Corp; 2017. 1–809 p.
14. Ouabou M, Annaz H, Maggi F, Ferrati M, Spinozzi E, El Amrani A. Chemical profile, insecticidal and repellent activities of four underexplored Moroccan essential oils against *Sitophilus oryzae*. *J Stored Prod Res*. 2025 May 1;111:102552. <https://doi.org/10.1016/J.JSPR.2025.102552>
15. Torralbo Cabrera YP, Pino Benítez N, Stashenko EE. Actividad repelente e insecticida de dos aceites esenciales de Piper del Nor-Occidente del Pacífico Colombiano. *Rev. Asoc. Colomb. Cienc. Biol.* 2022 Dec 18;59–67. <https://doi.org/10.47499/revistaacbb.v1i34.263>
16. Ray A, Jena S, Dash B, Kar B, Halder T, Chatterjee T, et al. Chemical diversity, antioxidant and antimicrobial activities of the essential oils from Indian populations of *Hedychium coronarium* Koen. *Ind*

- Crops Prod. 2018 Feb 1;112:353–62. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2017.12.033>
17. Hu Z, Wang P, Zhou H, Li Y. Extraction, characterization and *in vitro* antioxidant activity of polysaccharides from *Carex meyeriana* Kunth using different methods. Int J Biol Macromol. 2018 Dec 1;120:2155–64. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2018.09.125> PMID: 30248430
18. Li S, Chen L, Zhou Y. Essential oil obtained from *Chrysanthemum indicum* var. aromaticum leaf using solvent-less microwave irradiation-induced hydrodistillation and extraction in situ. Sustain Chem Pharm. 2023 Mar 13;36:2352–5541. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101259>
19. Boudraa H, Kadri N, Mouni L, Madani K. Microwave-assisted hydrodistillation of essential oil from fennel seeds: Optimization using Plackett–Burman design and response surface methodology. J Appl Res Med Aromat Plants. 2021 May 1;23:100307. <https://doi.org/10.1016/J.JARMAP.2021.100307>
20. Kusuma HS, Lestari FW, Sari TA, Mukhlisin F, Mahfud M, Sharma SK, et al. Extraction of essential oil from fresh basil leaves (*Ocimum basilicum* L.) using solvent-free microwave extraction method: Extraction parameter optimization, electric consumption, and CO2 emission study. Food and Humanity. 2023 Dec 1;1:1055–63. <https://doi.org/10.1016/J.FOOHUM.2023.08.025>
21. Rizkita CW, Qadariah L, Mahfud M, Sukardi S. Box Behnken design for optimization of essential oil extraction of ginger (zingiberaceae) by microwave hydrodistillation method. Egypt J Chem. 2025 Apr 1;68(4):333–41. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2024.301057.9978>
22. Nabila AR, Mahfud M. Oil extraction cardamom seed (*Amomum compactum*) by microwave hydrodiffusion and gravity method: Optimization using box-behnken design. AIP Conf Proc. 2025 Jun 18;3309(1). <https://doi.org/10.1063/5.0265281/3350434>
23. Zhang Q, Li C, Mi S, Xu X, He Z, Wang L, et al. Optimized essential oil extraction method based on salt solution-enhanced homogenization pretreatment and microwave extraction for *Kaempferia galanga* L. Microchem. J. 2025 Jun 1;213:113661. <https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2025.113661>
24. Zhang H, Yan H, Li Q, Lin H, Wen X. Identification of VOCs in essential oils extracted using ultrasound- and microwave-assisted methods from sweet cherry flower. Sci. Rep. 2021 Jan 13;11(1):1–13. <https://doi.org/10.1038/S41598-020-80891-0> PMID: 33441964
25. Hedayati S, Tarahi M, Baeghbali V, Tahsiri Z, Hashempur MH. Mint (*Mentha* spp.) essential oil extraction: from conventional to emerging technologies. Phytochem. Rev. 2024 Aug ;24(4):3157–78. <https://doi.org/10.1007/S11101-024-10020-6/FIGURES/6>
26. Chen F, Su X, Yan T, Fu X, Wang Y, Luo D, et al. Homogenate-ultrasonic pretreatment followed by microwave hydrodistillation of essential oil from rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) leaves: Kinetic, chemical composition, and biological activity. Sustain Chem Pharm. 2024 Dec 1;42:101744. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2024.101744>
27. Suttiarporn P, Seangwattana T, Srisurat T, Kongitthinon K, Chumnanvej N, Luangkamin S. Enhanced extraction of clove essential oil by ultrasound and microwave assisted hydrodistillation and their comparison in antioxidant activity. Curr. Res. Green Sustain. Chem. 2024 Jan 1;8:100411. <https://doi.org/10.1016/J.CRGSC.2024.100411>
28. Jia MZ, Fu XQ, Deng L, Li ZL, Dang YY. Phenolic extraction from grape (*Vitis vinifera*) seed via enzyme and microwave co-assisted salting-out extraction. Food Biosci. 2021 Apr 1;40:100919. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2021.100919>
29. Sarah M, Ardiansyah D, Misran E, Madinah I. Extraction of citronella oil from lemongrass (*Cymbopogon winterianus*) by sequential ultrasonic and microwave-assisted hydro-distillation. Alex. Eng. J. 2023 May 1;70:569–83. <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2023.03.019>
30. Pan X, Zhang X, Meng Y, Yang Y, Zhang H, Liu T, et al. Developing an effective approach based on microwave distillation and extraction using deep eutectic solvents for multiple target analytes prepared from *Eleutherococcus senticosus* fruits. Microchem. J. 2024 Dec 1;207:111905. <https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2024.111905>
31. Zhang Q, Ge D, Mi S, Lu Q. An eco-friendly and effective method for isolating essential oil from fresh *Kaempferia galanga* L.: Process optimization based on entropy weight method and response surface methodology. Sustain Chem Pharm. 2025 Jun 1;45:102042. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2025.102042>
32. Elyemni M, Louaste B, Nechad I, Elkamli T, Bouia A, Taleb M, et al. Extraction of Essential Oils of *Rosmarinus officinalis* L. by Two Different Methods: Hydrodistillation and Microwave Assisted Hydrodistillation. Sci. World J. 2019;2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3659432> PMID: 31057339
33. Mande P, Sekar N. Comparative study of chemical composition, antibacterial and antioxidant activity

- of essential oils isolated from the seeds of *Amomum subulatum* by using microwave extraction and hydro-distillation methods. J. Indian Chem. Soc. 2021 Nov 1;98(11):100201. <https://doi.org/10.1016/J.JICS.2021.100201>
34. Osae R, Apaliya MT, Kwaw E, Chisepo MTR, Yarley OPN, Antiri EA, et al. Drying techniques affect the quality and essential oil composition of Ghanaian ginger (*Zingiber officinale* Roscoe). Ind Crops Prod. 2021 Nov 15;172:114048. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2021.114048>
35. Bettaieb Rebey I, Bourgou S, Ben Kaab S, Aidi Wannes W, Ksouri R, Saidani Tounsi M, et al. On the effect of initial drying techniques on essential oil composition, phenolic compound and antioxidant properties of anise (*Pimpinella anisum* L.) seeds. J. Food Meas. Charact. 2020 Feb 1;14(1):220–8. <https://doi.org/10.1007/S11694-019-00284-4/METRICS>
36. Wang JZ, Du YS, Qi YT, Zhang C, Zhang ZR, Zhang HM, et al. Chemical Composition, Toxicity, and Repellency of Essential Oils from Three Hedychium Species Against Stored-Product Insects. Chem Biodivers. 2024 Apr 1;21(4). <https://doi.org/10.1002/CBDV.202301711>, PMID: 38372187
37. Pajaro-Castro N, Caballero-Gallardo K, Olivero-Verbel J. Neurotoxic Effects of Linalool and  $\beta$ -Pinene on *Tribolium castaneum* Herbst. Mol. : J. Synth. Chem. Nat. Prod. Chem. 2017 Dec 1;22(12):2052. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES22122052> PMID: 29186788
38. Lima AS, Nelson H, Junior PC, Costa-Junior LM, Monteiro OS, Guilherme J, et al. Anthelmintic effect of essential rhizome oil from Hedychium coronarium Koenig (Zingiberaceae) introd. Northeast. Braz. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2021.105912>
39. Dhifi W, Bellili S, Jazi S, Bahloul N, Mnif W, Nahar L, et al. Essential Oils' Chemical Characterization and Investigation of Some Biological Activities: A Critical Review. Medicines. 2016 Sep 22;3(4):25. <https://doi.org/10.3390/MEDICINES3040025> PMID: 28930135