

## Hidrodestilación asistida por microondas de aceite esencial de *Cúrcuma longa* (rizomas): optimización mediante superficie de respuesta

### Microwave-assisted hydrodistillation of essential oil of *Cúrcuma longa* (rhizomes): response surface optimization

José Leonardo Cano-Botero<sup>1</sup>  
Yeferson Ospina-Balvarena<sup>2</sup>  
Jorge Andrés Gutiérrez-Cifuentes<sup>3</sup>  
Eunice Ríos-Vásquez<sup>4</sup>

Recibido: junio 06 de 2022

Aceptado: diciembre 20 de 2022

#### Resumen

Las propiedades de las plantas de la familia Zingiberaceae son ampliamente conocidas a nivel mundial, en medicina tradicional, como antiinflamatorio, antioxidante, antiviral, entre otras. Enmarcados en el alto valor bioquímico de esta familia, esta investigación se centró en la optimización de un método de extracción de aceites esenciales de *Cúrcuma longa* a partir de rizomas secos de muestras colectadas en el Departamento del Quindío (Colombia), utilizando hidrodestilación asistida por microondas y evaluando variables optimizadas por metodología de superficie de respuesta. Los resultados obtenidos de la optimización mostraron una considerable mejora en la extracción de los aceites desde múltiples aspectos y variables, comparados con la hidrodestilación convencional. El rendimiento en la obtención del aceite esencial aumentó en un 32 %, se evidenció un incremento en un 31 % en la  $\alpha$ -Turmerona como componente más abundante, el tiempo de extracción se redujo de 120 a 59 minutos, y el consumo de energía y emisión de CO<sub>2</sub> se redujo a una tercera parte. Estos interesantes resultados incentivan el potencial mejoramiento de posibles aplicaciones en salud, alimentos o cosmética.

**Palabras clave:** aceite esencial, *Cúrcuma longa*, hidrodestilación, optimización.

#### Abstract

The properties of the plants of the Zingiberaceae family are widely known worldwide, in traditional medicine, as anti-inflammatory, antioxidant, antiviral, among others. Framed in the high biochemical value of this family, this research focused on the optimization of extracting essential oils method from *Curcuma longa dry rhizomes* collected in the Department of Quindío (Colombia), using microwave-assisted hydrodistillation and evaluating variables optimized by response surfaces. The results obtained from the optimization showed a considerable improvement in the oils extraction from some aspects and variables, compared to conventional hydrodistillation. The yield of essential increased by 32%, in  $\alpha$ -Turmerone as the most abundant component there was by 31%, the extraction time was reduced from 120 to 59 minutes, and the energy consumption and CO<sub>2</sub> emission were reduced by one third. These interesting results encourage the potential improvement of possible applications in health, food or cosmetics.

**Keywords:** essential oil, *Curcuma longa*, hydrodistillation, optimization.

1 Químico, Estudiante de Maestría en Química, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia. E-mail: [jlcanob@uqvirtual.edu.co](mailto:jlcanob@uqvirtual.edu.co)

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7957-0249>

2 Químico, Estudiante de Maestría en Química, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia. E-mail: [yospina@uniquindio.edu.co](mailto:yospina@uniquindio.edu.co)

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8350-2695>

3 Químico, Doctor en Ciencias Químicas, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia. E-mail: [jgutierrez@uniquindio.edu.co](mailto:jgutierrez@uniquindio.edu.co)

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3145-2398>

4 Química, Doctora en Ciencias Químicas, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia. E-mail: [erios@uniquindio.edu.co](mailto:erios@uniquindio.edu.co)

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9254-1079>

## 1. Introducción

*Cúrcuma longa* L. pertenece a la familia Zingiberaceae, sus rizomas son muy utilizados como colorante y aromatizante en la cocina oriental. Esta especie se distribuye en las regiones tropicales y subtropicales del mundo, y se cultiva ampliamente en países asiáticos, especialmente en India y China. Se ha utilizado en cosmética y en la medicina tradicional, donde se destaca por tener actividades antiinflamatorias, antioxidantes, antimicrobianas, anticancerígenas y antivirales (Mallmann et al., 2017; Rajkumari & Sanatombi, 2018; Villegas et al., 2021; Zhang et al., 2017, 2020).

Los Aceites Esenciales (AE), extraídos de los rizomas de *Cúrcuma longa* son ricos en sesquiterpenos, donde se presentan como componentes mayoritarios el zingibereno,  $\alpha$ -turmerona,  $\beta$ -turmerona y germacrona. El rendimiento y la calidad de los AE varía con la ubicación geográfica, las condiciones agroclimáticas, método de extracción, entre otros factores (Mallmann et al., 2017; Ray et al., 2021; Sahoo et al., 2019; Zhang et al., 2020).

Los AE usualmente se obtienen mediante hidrodestilación (HD), extracción con disolventes orgánicos y destilación por arrastre con vapor. Estos métodos convencionales tienen algunos inconvenientes, principalmente relacionados con la calidad y cantidad de los AE (Mokhtarikhah et al., 2020). En los últimos años se han utilizado algunas técnicas de extracción novedosas que incluyen fluidos supercríticos (EFS), extracción asistida por ultrasonido (EAU), y la hidrodestilación asistida por microondas (HDAM), que se aplican como alternativas avanzadas enmarcadas en AE. Estos métodos emergentes y alternativos reducen los tiempos de extracción, mejoran los rendimientos, reducen y eliminan el uso de solventes, minimizan los impactos ambientales y aumentan la calidad de los AE (Zhang et al., 2019; Zhang et al., 2017).

La HDAM como alternativa a las técnicas tradicionales de calentamiento en la extracción de AE, implica una rápida transferencia de energía,

calentamiento selectivo y más eficiente, gradientes térmicos reducidos, y respuesta temprana al control de calentamiento del proceso (Kazemi et al., 2021; Radivojac et al., 2020). En cuanto a la metodología de superficie de respuesta (MSR), se trata de una valiosa herramienta matemática que ha sido ampliamente utilizada para predecir los parámetros experimentales óptimos y construir un modelo matemático para analizar el efecto de interacción entre las variables involucradas en la extracción de los AE (Conde-Hernández et al., 2021; Lainez-Cerón et al., 2021; Liu et al., 2018).

El objetivo de este trabajo fue optimizar el porcentaje de rendimiento de los AE de los rizomas de *Cúrcuma longa*, mediante un MSR utilizando un diseño Box-Behnken (DBB). Asimismo, analizar el contenido metabólico por cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas (CGEM), y por último evaluar la eficiencia de la HDAM con respecto a la HD convencional.

## 2. Metodología

### 2.1 Material vegetal

Se obtuvieron 20 kg de rizomas de *Cúrcuma longa* fresca en el corregimiento de Pueblo Tapao, municipio de Montenegro, departamento del Quindío, Colombia. El material se secó 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 trituradora marca Oster Professional Series Beehive Blender Pst2, y se pasaron por un tamiz número 10 con abertura de 2.0 mm.

### 2.2 Extracción de aceite esencial por HDAM y HD

HDAM: se modificó un horno microondas convencional (SHARP, modelo R-211KL (W), con una potencia máxima de 800 W; variable en incrementos de 80W y una frecuencia de 2450 MHz). El horno microondas se adaptó para la

extracción realizando un agujero en la parte superior e instalando un condensador tipo Clevenger, teniendo en cuenta lo publicado por Zheng et al. (2020). En este sentido, se utilizaron 15 g de material vegetal para la correspondiente extracción, y el AE obtenido se almacenó a 4 °C hasta su análisis. El porcentaje de rendimiento (% R) de AE se calculó de acuerdo con la ecuación 1.

$$\% R = \frac{\text{masa (g) de AE}}{\text{masa (g) material vegetal}} \times 100 \% \quad (1)$$

HD: se sometieron 30 g de rizomas a HD durante 2 h usando un montaje tipo Clevenger, en una estufa comercial marca Haceb, con una potencia de 1100 W. Los experimentos se realizaron por triplicado y el porcentaje de rendimiento se obtuvo como su media aritmética. Los AE se secaron con Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> anhidro y se conservaron en viales ámbar a 4 °C hasta su uso (Modi et al., 2021).

### 2.3 Optimización mediante MSR con un diseño experimental Box Behnken

Se implementó un diseño de DBB con 3 factores: tiempo de irradiación, potencia de microondas

y volumen de disolvente, en 3 niveles [bajo (-1), medio (0) y alto (+1)], para investigar simultáneamente los efectos de los factores independientes sobre el rendimiento del AE. Estos factores se codificaron como se muestra en la tabla 1 (Boudraa et al., 2021). Los niveles de los factores fueron tomados según la metodología propuesta por Mollaei et al. (2019), en el diseño de único factor.

**Tabla 1.** Factores y niveles para el diseño de Box Behnken.

Variable independiente	Niveles		
	-1	0	1
Tiempo de irradiación Min (A)	20	40	60
Potencia del microondas W (B)	400	560	720
Volumen del disolvente mL (C)	75	112,5	150

En este diseño se evaluó el % R de los AE como variable de respuesta. Se realizaron 12 experimentos aleatorios, con tres réplicas aleatorias en el punto central (PC) que se aplicaron para probar el error experimental, como se observa en la tabla 2.

**Tabla 2.** Diseño experimental de Box Behnken con 3 PC.

Experimento	Tiempo (min)	Potencia (W)	Volumen (mL)
1	40	400	150
2 PC	40	560	112,5
3	20	560	75
4	40	720	75
5 PC	40	560	112,5
6	20	560	150
7	20	400	112,5
8	60	720	112,5
9	20	720	112,5
10	60	560	75
11	40	400	75
12 PC	40	560	112,5
13	60	400	112,5
14	40	720	150
15	60	560	150

Los resultados experimentales se analizaron mediante ANOVA en el programa STATGRAPHICS. La significancia de cada variable se evaluó usando una probabilidad P de 0.05 como nivel de confianza. Se construyeron gráficas tridimensionales de superficie de respuesta, para obtener información detallada sobre el proceso de optimización.

## 2.4 Consumo eléctrico y emisión de CO<sub>2</sub>

Un factor importante a tener en cuenta es la cantidad de energía utilizada durante el proceso de extracción y el impacto ambiental relacionado, que depende de la potencia de los equipos empleados y del tiempo de extracción. El consumo de energía se calcula mediante la ecuación 2.

$$E = P * t \quad (2)$$

Donde, E es el consumo de energía (kWh), P es la potencia aplicada (kW) y t es el tiempo de extracción (h).

La emisión de CO<sub>2</sub> es la cantidad de dióxido de carbono gaseoso liberado a la atmósfera durante la extracción y estimado de acuerdo con la literatura (Chen et al., 2022; Drinić et al., 2021; López-Hortas et al., 2020). Para obtener 1 kWh, se liberará a la atmósfera una cantidad de 800 g de CO<sub>2</sub> por la combustión de combustible fósil. La emisión de CO<sub>2</sub> se calcula mediante la ecuación 3.

$$ECO_2 = E * 800 \quad (3)$$

Donde, E CO<sub>2</sub> (g CO<sub>2</sub>) es la emisión de CO<sub>2</sub> y E (kWh) es el consumo de energía.

## 2.5 Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CGEM)

Los AE fueron analizados por CG-EM en un equipo marca SHIMADZU serie QP2010 ultra. El método utilizado implementó helio como gas portador, con un flujo de 1 mL/min, las muestras se prepararon diluyendo en una relación 1:20 v/v con diclorometano y se inyectó 1 µL en modo

Split. Se utilizó una columna Zebron ZB-5MS 5% Polisilarileno – 95% polidimetilsiloxano (30 m L × 0.25 mm ID × 0.25 µm df). Las temperaturas de la columna, el inyector y la línea de transferencia se ajustaron a 40, 300 y 300 °C, respectivamente. La rampa de calentamiento se programó inicialmente a la temperatura de la columna y se ajustó a 40 °C manteniéndose constante durante 2 min, luego se incrementó gradualmente hasta llegar a una temperatura de 260 °C, a una velocidad de 5°C por min. Alcanzada esta temperatura, se efectuó un incremento a 310 °C a una velocidad de 20 °C por min, manteniéndose inalterada por 3 min. El espectrómetro de masas utilizado posee un sistema de ionización de impacto electrónico de 70 eV, los análisis se efectuaron en modo Scan, con un intervalo de análisis de 40 a 450 en relación m/z. Los componentes del AE se identificaron por similitud de sus tiempos de retención, índice de Kovats y espectros de masas proporcionados por la biblioteca NIST 2013. Además, los componentes con similitudes menores al 95 % fueron identificados de acuerdo con Adams (2017), mediante la comparación de sus índices Kovats y sus espectros de masa, determinados sobre la base de los tiempos de retención de n-alcános C8 -C25.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Diseño experimental de Box Behnken

En la tabla 3 se observan los datos experimentales del DBB obtenidos bajo diferentes combinaciones, y la variable de respuesta, que en este caso es el % R de los AE.

**Tabla 3.** Diseño experimental de Box Behnken para evaluar el rendimiento de extracción de AE.

Experimentos	Tiempo (A) (min)	Potencia (B) (W)	Volumen (C) (mL)	% AE
1	40	400	150	2,904
2	40	560	112,5	3,722
3	20	560	75	2,550
4	40	720	75	3,761
5	40	560	112,5	3,798
6	20	560	150	2,690
7	20	400	112,5	2,361
8	60	720	112,5	4,482
9	20	720	112,5	3,160
10	60	560	75	3,678
11	40	400	75	2,756
12	40	560	112,5	3,784
13	60	400	112,5	3,328
14	40	720	150	4,216
15	60	560	150	3,975

Los coeficientes de correlación evaluados de los términos lineales (A, B, C), cuadráticos (A2, B2, C2) y de interacción (AB, AC, BC) del modelo se muestran en la tabla 4, así como el análisis de varianza para % R del AE.

### 3.2 Análisis de varianza para % rendimiento del AE

La aceptabilidad del modelo se evaluó mediante la falta de ajuste de los valores P. El análisis de varianza demostró una falta de ajuste no significativa para todas las respuestas ( $P > 0,05$ ), lo que afirma que el modelo es preciso y satisfactorio.

**Tabla 4.** ANOVA para % rendimiento AE.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tiempo	2,763	1	2,763	1689,24	0,0006
B: Potencia	2,279	1	2,279	1393,1	0,0007
C: Volumen	0,1352	1	0,1352	82,64	0,011
AA	0,356	1	0,356	217,76	0,0046
AB	0,0315	1	0,0315	19,26	0,048
AC	0,0061	1	0,0061	3,77	0,191
BB	0,0573	1	0,0573	35,05	0,0274
BC	0,0235	1	0,0235	14,4	0,0629
CC	0,2023	1	0,2023	123,71	0,008
Falta de ajuste	0,0219	3	0,00730	4,47	0,188
Error puro	0,0032	2	0,00163		
Total (corr.)	5,812	14			
	R2			99,5664%	
	R 2 ajustada			98,786%	

El estadístico R2 sugiere que el modelo explica 99,5664% de la variabilidad en porcentaje de rendimiento del AE. Adicionalmente, el estadístico R2 ajustado 98,786% es el más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes. Los resultados indican que, R2 y R2 ajustada están muy cerca uno del otro, sugiriendo que los

valores experimentales están próximos a los predichos por el modelo. La tabla ANOVA para el porcentaje de rendimiento de los AE muestra que 7 efectos tienen un ( $P < 0.05$ ), sugiriendo que son significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0 %, como se muestra en el gráfico de Pareto (figura 1).

Diagrama de Pareto Estandarizada para % rendimiento AE

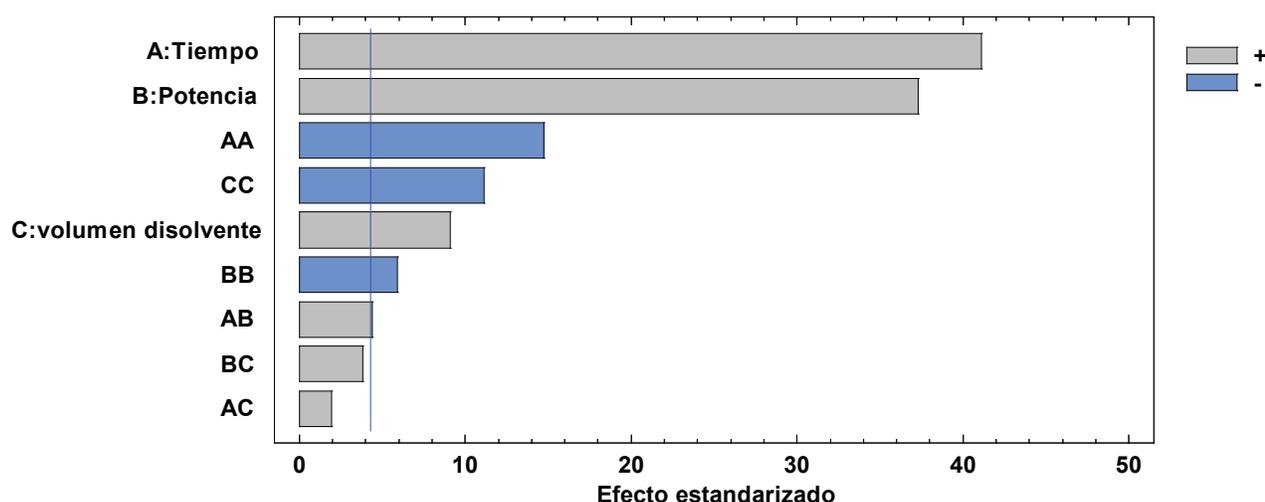


Figura 1. Rendimientos globales estandarizados en el diagrama de Pareto con efecto negativo (azul) y efecto positivo (gris).

En la figura 1 se observa que los términos lineales A, B y el término cuadrático A2 son los factores que más afectan la extracción de los AE, con p valores de 0.006, 0.007 y 0.0046, respectivamente. La ecuación 4 representa la regresión polinomial de los factores, que afectan la extracción de los AE .

$$Y = -2,87 + 0,0700 * A + 0,00623 * B + 0,03167 * C - 0,00077 * A^2 + 0,00002 * A * B + 0,000052 * A * C - 0,000004 * B^2 + 0,000012 * B * C - 0,00016 * C^2 \quad (4)$$

Donde A, B, C son las variables independientes estudiadas y Y es la variable de respuesta para el % R del AE. En la ecuación 4 los signos positivos y negativos, muestran efectos sinérgicos (+) y antagonistas (-) en la extracción de los AE.

### 3.3 Optimización de las variables involucradas en la HDAM

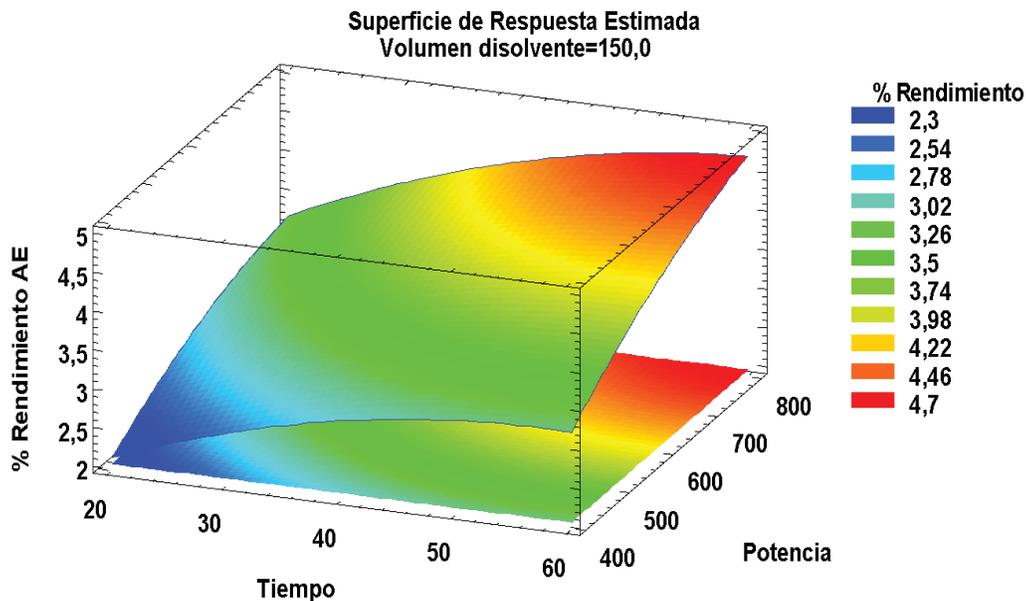
*Análisis entre el tiempo de extracción (A) y la potencia (B) a volumen constante (C)*

Para verificar la interacción entre los parámetros de extracción y la variable de respuesta, se analizaron los gráficos de superficie de respuesta (GSR) como se muestra en las figuras 2, 3 y 4.

En la figura 2 se observa el gráfico en 3D de la superficie de respuesta de la extracción del AE. El efecto del tiempo de extracción se examinó a niveles entre 20 y 60 min, encontrando que el

rendimiento más alto de AE se da entre 55 y 60 min. Además, los porcentajes de rendimiento aumentan significativamente al aumentar la potencia de 400 a 720 W. Lo anterior se puede deber al efecto de las ondas electromagnéticas, instantáneas, masivas y efectivas en forma de

calor dentro de las células, lo que da como resultado un mayor estrés térmico y un aumento de la presión interna debido a la vaporización del líquido intracelular (Akloul et al., 2014; Conde-Hernández et al., 2021; Liu et al., 2018; Radivojac et al., 2020; Yingngam et al., 2021).

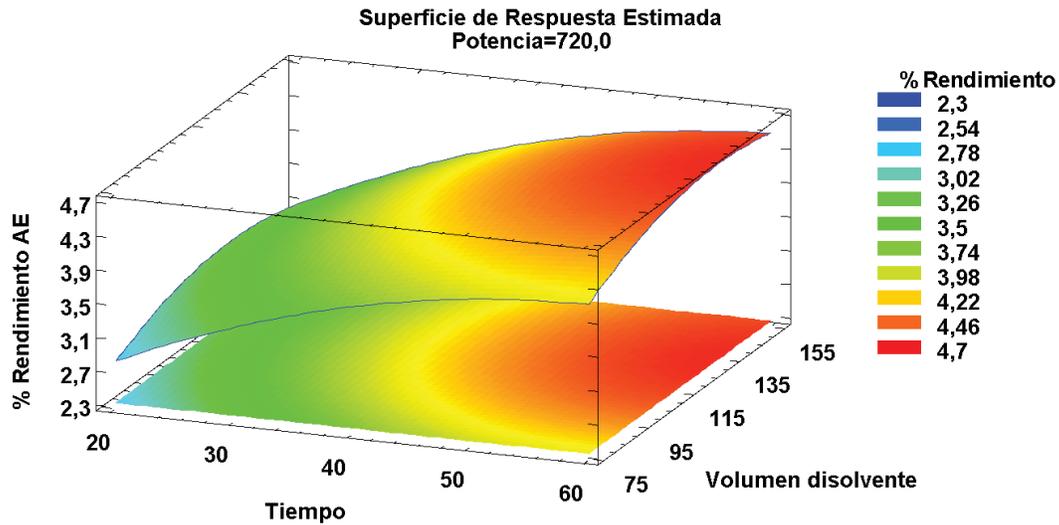


**Figura 2.** Superficie de respuesta estimada en función del tiempo de extracción Vs la potencia de las microondas.

*Análisis entre el tiempo de extracción (A) y el volumen de disolvente (C) a potencia constante*

La figura 3 muestra la interacción entre el tiempo de extracción (A) y el volumen de disolvente (C) en el rendimiento de extracción. El rendimiento del AE incrementa al aumentar el volumen de disolvente hasta llegar a 115 mL, después de este volumen no se evidenció ningún cambio en el rendimiento, lo que explica que mayores volúmenes de disolvente no mejoran el rendimiento de los AE. Por lo general, el rendimiento de la extracción por microondas aumenta con la temperatura con un comportamiento logarítmico. Este resultado puede deberse al aumento de la migración

molecular y la tasa de disolución de solutos durante el proceso de calentamiento. Sin embargo, si la temperatura es demasiado alta, el consumo de energía aumentará pero no lo hará el rendimiento de extracción (Mollaei et al., 2019; Solanki et al., 2019).

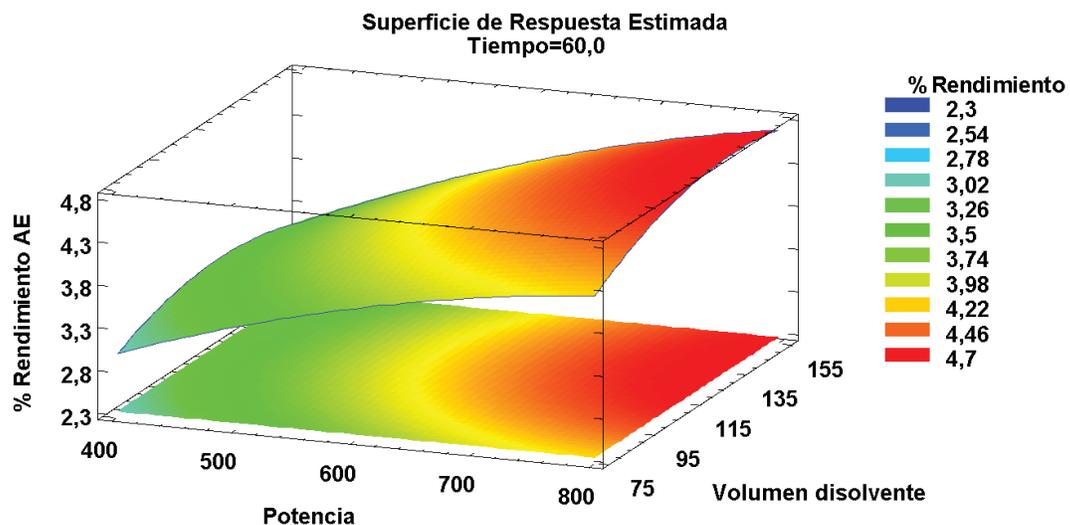


**Figura 3.** Superficie de respuesta estimada en función del tiempo de extracción y el volumen de disolvente.

*Análisis entre la potencia (B) y el volumen de disolvente (C) a tiempo constante (A)*

La figura 4 muestra la influencia de la potencia de microondas (B) y el volumen de disolvente (C) en el rendimiento de los AE. Como se observa, los rendimientos de extracción aumentaron al

incrementar la potencia de las microondas entre 720 y 800 W. Sin embargo, cuando la cantidad de agua es alta, la relación de absorción de energía de las microondas del material vegetal respecto al medio se ve desfavorecida, y por ende disminuye el efecto sobre las células de la materia prima, y así el rendimiento del AE (Zhang et al., 2019).



**Figura 4.** Superficie de respuesta estimada en función de la potencia (B) y el volumen de disolvente.

### Comparación de la eficiencia de extracción del AE obtenida por HDAM optimizado y HD convencional

Mediante el análisis de superficie de respuesta del modelo de regresión y para maximizar el rendimiento del AE de los rizomas de *Cúrcuma longa*, se encontró que las condiciones óptimas de extracción para la HDAM correspondieron

a un volumen de 132,19 mL, un tiempo de extracción de 59 min, y una potencia de 720 W. En estas condiciones de extracción, el modelo de regresión predice que el rendimiento del AE es de 4.6 %. La figura 5 muestra la combinación de niveles de los factores que maximiza la función de deseabilidad en la región indicada para una condición óptima.

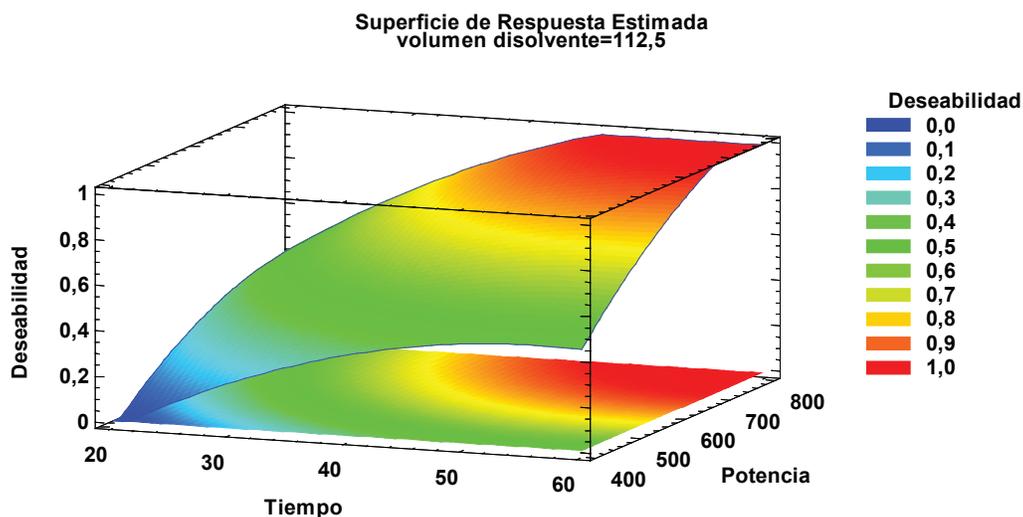


Figura 5. Superficie de respuesta estimada en función de deseabilidad.

Teniendo en cuenta los parámetros de optimización obtenidos, se realizó por triplicado la HDAM, dando como resultado  $4.88 \pm 0.0360$  %, valor altamente cercano al predicho por el modelo. Además, se obtuvieron los AE por HD convencional, con un % R de  $3.306 \pm 0.046$  %, es decir 32 % menos que por el método HDAM. Los resultados se compararon con reportes previos donde se realizaron extracciones del AE de rizomas secos de *Kaempferia galanga* (Zingiberaceae) a través de HDAM y HD, análisis por MSR y de varianza (ANOVA), encontrando que el mayor rendimiento del AE se obtuvo a una potencia de 800 W, 28,38 min y relación sólida/líquido de 100 g/488,8 mL, soportando la importancia de la MSR como una potente herramienta matemática y estadística para

optimizar las variables involucradas en el proceso de HDAM (Hearunyakij y Phutdhawong, 2022).

### 3.4 Consumo eléctrico y emisión de CO<sub>2</sub>

Los impactos ambientales se evaluaron mediante el cálculo del consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los valores de consumo de energía de la HDAM y HD fueron 0.708 kWh y 2.2 kWh, respectivamente. Los resultados sugieren que el uso del microondas como método de extracción genera un ahorro energético considerable equivalente a 2 veces menos que lo requerido en la HD, además de que por HDAM se obtuvo un mayor rendimiento en menor tiempo. Este estudio se comparó con algunos resultados obtenidos por otros autores y en otras especies,

donde analizaron la HDAM con la HD para extraer el AE de las cortezas de *Cinnamomum cassia* (Lauraceae), encontrando que la HDAM requirió solo 0,4 kWh (250 W durante 90 min), en comparación con el HD que consumió 1,0 kWh (350 W durante 150 min) (Jeyaratnam et al., 2016). Reportes de la extracción del AE de flores de lavanda por HDAM, confirmaron también un ahorro en el consumo de energía de 3.154 kWh con respecto a la HD (Filly et al., 2016).

En este sentido, el consumo de energía en la HDAM es proporcional al tiempo y la potencia aplicada. Sin embargo, algunas investigaciones encontraron que el uso de la irradiación por microondas no disminuyó la cinética de extracción, lo que llevó al aumento del consumo de energía; esto tal vez se debe a que las condiciones de operación del método de extracción no fueron optimizadas, lo que haría necesaria su optimización antes de realizar la extracción (Benmoussa et al., 2023).

En el presente estudio, las implicaciones ambientales se relacionan con el consumo total de energía con respecto a la huella de CO<sub>2</sub> emitido. En este sentido, las emisiones de CO<sub>2</sub> fueron 566 g para HDAM y 1760 g para HD, lo que implica una notable reducción cuando se utiliza la HDAM. En investigaciones donde se optimizaron los parámetros de extracción en la HDAM, por ejemplo, en la extracción del AE de la corteza de *Cinnamomum cassia*, la cantidad de emisión de CO<sub>2</sub> fue de 330 g después de 90 min de HDAM bajo 250 W, contra 779 g CO<sub>2</sub> tras 150 min de la HD a 350 W (Jeyaratnam et al., 2016). En otro reporte sobre la extracción del AE de la misma especie, *C. cassia*, se encontró menor liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera: 238,4 g CO<sub>2</sub> (durante 30 min) contra 2761,6 g CO<sub>2</sub> por HD (durante 120 min) (Benmoussa et al., 2023). Al comparar los resultados obtenidos en el presente estudio con los mencionados anteriormente, se puede sugerir que probablemente las emisiones de CO<sub>2</sub> están directamente relacionadas con la energía utilizada y el tiempo de extracción. Por tanto, se considera necesaria la optimización de los parámetros de funcionamiento para las

extracciones de AE (Ait Amer Meziane et al., 2020).

### 3.5 Composición química de los AE

En los AE se identificaron un total de cincuenta (50) componentes, estos representaron el 97,77 % para HD y 99,67 % para HDAM. Además, se encontraron a los sesquiterpenos oxigenados como la familia estructural más abundante para ambas metodologías, con porcentajes que oscilan entre el 89 y 78 %, respectivamente (ver tabla 5).

**Tabla 5.** Componentes de los AE obtenidos por HD y HDAM.

TR	Nombre	IR (exp)	IR (tR)	Área relativa (%) HDAM-Opt.	Área relativa (%) HD
10.755	$\alpha$ - Felandreno	1002	1002	0,337 $\pm$ 0,05	1,153 $\pm$ 0,14
11.357	p-Cimeno	1023	1020	0,177 $\pm$ 0,01	0,637 $\pm$ 0,06
11.602	Eucaliptol	1031	1026	0,757 $\pm$ 0,08	2,183 $\pm$ 0,19
22.707	$\beta$ -Dupreziano	1422	1421	0,273 $\pm$ 0,02	0,590 $\pm$ 0,07
23.327	Metilisoegenol	1447	1453	0,160 $\pm$ 0,08	0,533 $\pm$ 0,05
23.464	(E)- $\beta$ -Farneseno	1452	1454	0,100 $\pm$ 0,01	0,237 $\pm$ 0,03
23.631	Sesquisabineno	1459	1457	0,073 $\pm$ 0,01	0,193 $\pm$ 0,02
24.117	-Gurjuneno	1478	1475	1,120 $\pm$ 0,07	0,163 $\pm$ 0,05
24.217	$\alpha$ -Himachaleno	1482	1481	2,957 $\pm$ 0,41	2,357 $\pm$ 0,28
24.549	$\alpha$ -Zingibereno	1495	1493	0,557 $\pm$ 0,03	4,700 $\pm$ 0,43
24.866	$\beta$ -Curcumeno	1509	1515	2,870 $\pm$ 0,16	1,093 $\pm$ 0,16
25.262	$\beta$ -Sesquiphellandreno	1525	1522	0,293 $\pm$ 0,01	4,960 $\pm$ 0,33
25.351	(E)- Bisaboleno	1529	1531	0,080 $\pm$ 0,01	0,310 $\pm$ 0,14
25.946	Nerolidol	1554	1542	0,100 $\pm$ 0,01	0,393 $\pm$ 0,26
26.045	Epi-Longipinanol	1558	1563	0,230 $\pm$ 0,01	0,367 $\pm$ 0,00
26.165	Palustrol	1563	1568	0,507 $\pm$ 0,04	0,520 $\pm$ 0,04
26.496	Himachaleno epóxido	1577	1579	0,297 $\pm$ 0,02	1,153 $\pm$ 0,17
26.621	Óxido Cariofileno	1582	1583	0,845 $\pm$ 0,06	0,823 $\pm$ 0,02
26.910	Cedrol	1595	1600	2,233 $\pm$ 0,49	2,920 $\pm$ 0,02
27.205	$\beta$ -Eudesmol	1607	1607	0,660 $\pm$ 0,07	0,630 $\pm$ 0,05
27.447	Cubenol	1618	1619	NE	1,017 $\pm$ 0,04
27.659	$\alpha$ -Cedrenona	1628	1627	0,483 $\pm$ 0,04	NE
27.854	-Eudesmol	1636	1632	0,473 $\pm$ 0,04	2,407 $\pm$ 0,22
27.947	T-Muurolol	1640	1642	2,117 $\pm$ 0,18	0,563 $\pm$ 0,09
28.214	$\alpha$ -Cadinol	1652	1654	0,510 $\pm$ 0,07	0,617 $\pm$ 0,05
28.463	Bisabol-11-ol	1663	1668	0,563 $\pm$ 0,05	NE
28.659	ar-Turmerona	1672	1669	21,050 $\pm$ 0,6	18,920 $\pm$ 1,1
28.773	$\alpha$ -Turmerona	1677	1670	29,600 $\pm$ 2,3	22,677 $\pm$ 2,4
29.137	(E, E)-germacrona	1693	1693	0,923 $\pm$ 0,10	0,900 $\pm$ 0,12
29.320	$\beta$ -Santalol	1702	1702	0,137 $\pm$ 0,12	NE
29.480	$\beta$ -Turmerona	1709	1672	16,687 $\pm$ 2,8	14,787 $\pm$ 1,0
29.686	Curcufenol	1715	1718	0,293 $\pm$ 0,25	NE
29.774	Criptomeriona	1723	1724	0,133 $\pm$ 0,08	0,297 $\pm$ 0,03
29.893	Longifolol	1728	1729	0,063 $\pm$ 0,05	NE
29.989	Zerumbona	1733	1733	0,140 $\pm$ 0,05	NE
30.150	Farnesol	1740	1743	0,083 $\pm$ 0,03	NE

Hidrodestilación asistida por microondas de aceite esencial de *Cúrcuma longa* (rizomas): optimización mediante superficie de respuesta

30.351	Curcumén-12-ol	1750	1756	0,980±0,07	0,790±0,18
30.485	Ciccolorenona	1756	1760	0,260±0,04	0,253±0,18
30.619	β-Bisabolenal	1762	1769	2,495±0,26	1,703±0,10
30.772	Escumulosona	1770	1771	2,085±0,67	1,227±0,33
30.839	α-Atlantona	1773	1778	0,455±0,57	0,415±0,04
30.988	β-Bisaboleno	1780	1789	2,185±0,00	1,350±0,50
31.395	Acetato de bisabolol	1799	1798	0,450±0,15	NE
31.473	8-hidroxi-γ-cadineno	1802	1803	0,235±0,33	1,070±0,40
31.823	Acetato de santalilo	1820	1819	1,705±0,14	0,167±0,01
33.285	Cedranediol	1892	1889	0,145±0,02	0,445±0,34
Total componentes identificados				99,67%	97,77%
Monoterpenos				0,507%	1,79%
Monoterpenos oxigenados				0,757%	2,183%
Sesquiterpenos				8,476%	15,33%
Sesquiterpenos oxigenados				89,93%	78,46%

En la figura 6 se puede observar la Ar-turmerona α-turmerona y β-turmerona, como los componentes mayoritarios obtenidos en este estudio, tanto para la HD como para HDAM.

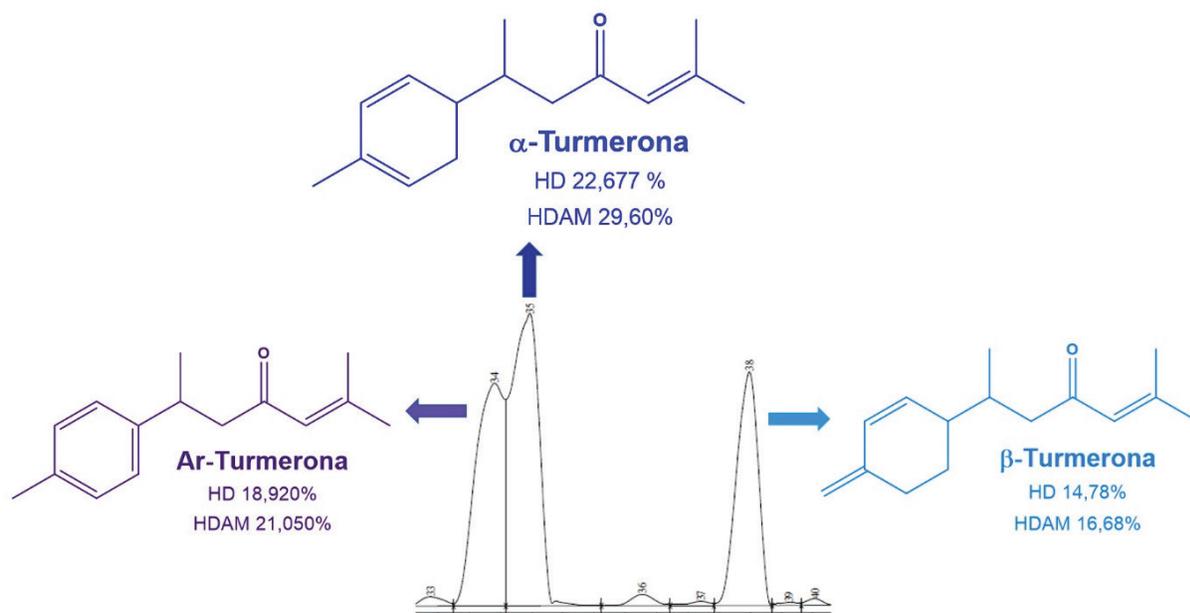


Figura 6. Principales componentes de los AE obtenidos.

Los AE extraídos por HDAM mostraron un aumento en los componentes mayoritarios con respecto a la HD, correspondiente al 11 % para Ar-turmerona, 31 % α-turmerona y 13.5 % para la β-turmerona. Esto puede deberse

al efecto de la radiación por microondas, ya que en este proceso las interacciones con el campo electromagnético son responsables de la transferencia de energía al material vegetal. Es importante aclarar que el contenido de agua

dentro del material vegetal determina el grado de absorción de la radiación. En este sentido, la conducción iónica y la rotación del dipolo son mecanismos de transferencia de energía, dado que la dirección del campo electromagnético cambia rápidamente y las moléculas intentan alinearse continuamente. Así, la energía cinética generada y la fricción inducida por la colisión de dipolos cercanos produce calor, que da como resultado una diferencia de presión al interior y el exterior de las células vegetales, provocando la ruptura y difusión del AE hacia el medio. Estos fenómenos aceleran la extracción y aumenta el rendimiento (Radivojac et al., 2020).

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Radivojac et al. (2020), quienes informaron que los principales constituyentes de los AE de *Cúrcuma longa* fueron Ar-turmerona (24,4%),  $\alpha$ -turmerona (20,5%) y  $\beta$ -turmerona (11,1%) en rizoma fresco y Ar-turmerona (21,4%),  $\alpha$ -santaleno (7,2%) y Ar-curcumeno (6,6 %) en rizomas secos. En otro estudio, Singh et al. (2010), informaron que la Ar-turmerona (30,3 %), la  $\alpha$ -turmerona (26,5 %) y la  $\beta$ -turmerona (19,1 %) fueron los componentes mayoritarios en este AE. Mientras tanto, Kutti Gounder y Lingamallu (2012), reportaron la composición de AE de dos variedades de *Cúrcuma longa* cultivadas en Etiopía, y encontraron como componentes mayoritarios a la  $\alpha$ -turmerona (32,41 y 35,16%), Ar-turmerona (25,20 y 25,47%) y  $\beta$ -turmerona (17,98 y 18,19%).

No obstante, otras investigaciones han reportado a la Ar-Turmerona como componente mayoritario (Jugreet et al., 2020). Estas variaciones en el contenido metabólico de los AE se deben, posiblemente, a factores, como: la etapa de desarrollo de la planta, período de cosecha y postcosecha, variación de las condiciones meteorológicas, variación geográfica/altitudinal, variación genética, método de extracción, tiempo de secado y tiempo de extracción (Jugreet et al., 2020).

Los AE de *Cúrcuma longa* presentan una amplia actividad biológica, y algunos autores sostienen que esta actividad depende principalmente

de sus componentes mayoritarios. Estudios in vitro han sugerido que tienen actividad antiinflamatoria, inmunomoduladora, anticancerígenas, antifúngicas y efectos inhibitorios sobre la  $\beta$ -secretasa, un posible contribuyente al desarrollo de la enfermedad de Alzheimer. También se ha demostrado que la Ar-turmerona tiene efectos antiangiogénicos en células endoteliales humanas HMEC-1 (De Souza Tavares et al., 2016; Mallmann et al., 2017; Singh et al., 2010; Zhang et al., 2017; Zheng et al., 2020). Así mismo, se han reportado efectos inhibidores antiplasmodiales y específicos contra *Plasmodium falciparum* (Yue et al., 2015), y antioxidantes e inmunomoduladores, sobre *Leishmania major*, el agente causante de la leishmaniasis cutánea zoonótica (Ali et al., 2020).

#### 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran como la asistencia por radiación de microondas favorece la extracción de AE de *Cúrcuma longa* desde múltiples aspectos, con un aumento del rendimiento del 32 %, en el área relativa del compuesto mayoritario ( $\alpha$ -turmerona), y una disminución del tiempo a 59 min, de consumo de energía a 0.72 kWh y de emisión de CO<sub>2</sub> a 576 g.

El buen rendimiento obtenido bajo esta metodología abre un abanico de posibles aplicaciones en el campo de la salud, que se podrían materializar en nuevas formulaciones para tratar patologías emergentes. En este sentido, se realza la importancia de seguir en la búsqueda de diferentes alternativas, extracciones y procesos amigables con el ambiente, y promocionar así metodologías verdes con aumentos en la eficiencia y en contenidos metabólicos.

#### Referencias

Adams, P. R. (2017). *Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/Mass Spectrometry*. USA: Allured Publishing Corporation.

- Ait Amer Meziane, I., Maizi, N., Abatzoglou, N., & Benyoussef, E. H. (2020). Modelling and optimization of energy consumption in essential oil extraction processes. *Food and Bioproducts Processing*, 119, 373–389. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2019.11.018>
- Benmoussa, H., Béchohra, I., He, S., Elfalleh, W., & Chawech, R. (2023). Optimization of sono-hydrodistillation and microwave assisted hydrodistillation by response surface methodology for extraction of essential oils from *Cinnamomum cassia* barks. *Industrial Crops and Products*, 192, 115995. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2022.115995>
- Boudraa, H., Kadri, N., Mouni, L., & Madani, K. (2021). Microwave-assisted hydrodistillation of essential oil from fennel seeds: Optimization using Plackett–Burman design and response surface methodology. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 23, 100307. <https://doi.org/10.1016/J.JARMAP.2021.100307>
- Conde-Hernández, L. A., Botello-Ojeda, A. G., Alonso-Calderón, A. A., Osorio-Lama, M. A., Bernabé-Loranca, M. B., & Chávez-Bravo, E. (2021). Optimization of Extraction of Essential Oils using Response Surface Methodology: A Review. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 24(5). <https://doi.org/10.1080/0972060X.2021.1976286>
- Chen, Y., Xu, F., Pang, M., Jin, X., Lv, H., Li, Z., & Lee, M. (2022). 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. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 27, 100695. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2022.100695>
- De Souza Tavares, W., Akhtar, Y., Gonçalves, G. L. P., Zanuncio, J. C., & Isman, M. B. (2016). Turmeric powder and its derivatives from *Curcuma longa* rhizomes: Insecticidal effects on cabbage looper and the role of synergists. *Scientific Reports*, 6 (1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/SREP34093>
- Drinić, Z., Pljevljakušić, D., Janković, T., Zdunić, G., Bigović, D., & Šavikin, K. (2021). Hydro-distillation and microwave-assisted distillation of *Sideritis raeseri*: Comparison of the composition of the essential oil, hydrolat and residual water extract. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 24, 100538. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2021.100538>
- Filly, A., Fabiano-Tixier, A. S., Louis, C., Fernandez, X., & Chemat, F. (2016). Water as a green solvent combined with different techniques for extraction of essential oil from lavender flowers. *Comptes Rendus Chimie*, 19 (6), 707–717. <https://doi.org/10.1016/J.CRCI.2016.01.018>
- Hearunyakij, M., & Phutdhawong, W. (2022). Optimization, Yield and Chemical Composition of Essential Oil from *Kaempferia galanga* L. Rhizome: Comparative Study with Microwave Assisted Extraction and Hydrodistillation. *Journal of Essential Oil - Bearing Plants*, 25 (3), 444–455. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2022.2108727>
- Jeyaratnam, N., Nour, A. H., Kanthasamy, R., Nour, A. H., Yuvaraj, A. R., & Akindoyo, J. O. (2016). Essential oil from *Cinnamomum cassia* bark through hydrodistillation and advanced microwave assisted hydrodistillation. *Industrial Crops and Products*, 92, 57–66. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2016.07.049>
- Kazemi, M., Niazi, A., & Yazdanipour, A. (2021). Extraction of *Satureja Rechingeri* volatile components through ultrasound-assisted and microwave-assisted extractions and comparison of the chemical composition with headspace solid-phase microextraction. *Journal of Essential Oil Research*, 34(1). <https://doi.org/10.1080/10412905.2021.1975575>
- Kutti-Gounder, D., & Lingamallu, J. (2012). Comparison of chemical composition and antioxidant potential of volatile oil from fresh, dried and cured turmeric (*Curcuma longa*) rhizomes. *Industrial Crops and Products*, 38 (1), 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.01.014>
- Lainez-Cerón, E., Jiménez-Munguía, M. T., López-Malo, A., & Ramírez-Corona, N. (2021). Effect of process variables on heating profiles and extraction mechanisms during hydrodistillation

- of eucalyptus essential oil. *Heliyon*, 7(10), e08234. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E08234>
- Liu, Z., Deng, B., Li, S., & Zou, Z. (2018). Optimization of solvent-free microwave assisted extraction of essential oil from *Cinnamomum camphora* leaves. *Industrial Crops and Products*, 124, 353–362. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.016>
- López-Hortas, L., Falqué, E., Domínguez, H., & Torres, M. D. (2020). Microwave hydrodiffusion and gravity versus conventional distillation for *Acacia dealbata* flowers. Recovery of bioactive extracts for cosmetic purposes. *Journal of Cleaner Production*, 274, 123143. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123143>
- Mallmann, C. A., Brugnari, T., Abreu Filho, B. A. de, Mikcha, J. M. G., & Machinski, M. (2017). *Curcuma longa* L. essential oil composition, antioxidant effect, and effect on *Fusarium verticillioides* and fumonisin production. *Food Control*, 73, 806–813. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2016.09.032>
- Modi, P. I., Parikh, J. K., & Desai, M. A. (2021). Intensified approach towards isolation of cinnamon oil using microwave radiation: parametric, optimization and comparative studies. *Industrial Crops and Products*, 173, 114088. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2021.114088>
- Mokhtarikhah, G., Ebadi, M. T., & Ayyari, M. (2020). Qualitative changes of spearmint essential oil as affected by drying methods. *Industrial Crops and Products*, 153, 112492. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2020.112492>
- Mollaie, S., Sedighi, F., Habibi, B., Hazrati, S., & Asgharian, P. (2019). Extraction of essential oils of *Ferulago angulata* with microwave-assisted hydrodistillation. *Industrial Crops and Products*, 137, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.015>
- Radivojac, A., Bera, O., Micić, D., Đurović, S., Zeković, Z., Blagojević, S., & Pavlić, B. (2020). Conventional versus microwave-assisted hydrodistillation of sage herbal dust: Kinetics modeling and physico-chemical properties of essential oil. *Food and Bioproducts Processing*, 123, 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.06.015>
- Rajkumari, S., & Sanatombi, K. (2018). *Nutritional value, phytochemical composition, and biological activities of edible Curcuma species: A review. International Journal of Food Properties*, 20(s3). <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1387556>
- Ray, A., Mohanty, S., Jena, S., Sahoo, A., Acharya, L., Panda, P. C., Sial, P., Duraisamy, P., & Nayak, S. (2021). Drying methods affects physicochemical characteristics, essential oil yield and volatile composition of turmeric (*Curcuma longa* L.). *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 100357. <https://doi.org/10.1016/J.JARMAP.2021.100357>
- Sahoo, A., Kar, B., Jena, S., Dash, B., Ray, A., Sahoo, S., & Nayak, S. (2019). Qualitative and Quantitative Evaluation of Rhizome Essential Oil of Eight Different Cultivars of *Curcuma longa* L. (Turmeric). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 22 (1). <https://Doi-Org.Crai.Referencistas.Com/10.1080/0972060X.2019.1599734>, 22(1), 239–247. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2019.1599734>
- Singh, G., Kapoor, I. P. S., Singh, P., de Heluani, C. S., de Lampasona, M. P., & Catalán, C. A. N. (2010). Comparative study of chemical composition and antioxidant activity of fresh and dry rhizomes of turmeric (*Curcuma longa* Linn.). *Food and Chemical Toxicology*, 48 (4), 1026–1031. <https://doi.org/10.1016/J.FCT.2010.01.015>
- Solanki, K. P., Desai, M. A., & Parikh, J. K. (2019). Microwave intensified extraction: A holistic approach for extraction of citronella oil and phenolic compounds. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 146, 107694. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107694>
- Villegas, C., Perez, R., Sterner, O., González-Chavarria, I., & Paz, C. (2021). Curcuma as an adjuvant in colorectal cancer treatment. *Life Sciences*, 286, 120043. <https://doi.org/10.1016/J.LFS.2021.120043>
- Yue, G. G. L., Kwok, H. F., Lee, J. K. M., Jiang, L., Chan, K. M., Cheng, L., Wong, E. C. W., Leung,

P. C., Fung, K. P., & Lau, C. B. S. (2015). Novel anti-angiogenic effects of aromatic-turmerone, essential oil isolated from spice turmeric. *Journal of Functional Foods*, 15, 243–253. <https://doi.org/10.1016/J.JFF.2015.03.030>

Zhang, H., Lou, Z., Chen, X., Cui, Y., Wang, H., Kou, X., & Ma, C. (2019). Effect of simultaneous ultrasonic and microwave assisted hydrodistillation on the yield, composition, antibacterial and antibiofilm activity of essential oils from *Citrus medica* L. var. *sarcodactylis*. *Journal of Food Engineering*, 244, 126–135. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2018.09.014>

Zhang, L., Liang, X., Ou, Z., Ye, M., Shi, Y., Chen, Y., Zhao, J., Zheng, D., & Xiang, H. (2020). Screening of chemical composition, anti-arthritis, antitumor and antioxidant capacities of essential oils from four Zingiberaceae herbs. *Industrial Crops and Products*, 149, 112342. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2020.112342>

Zhang, L., Yang, Z., Chen, F., Su, P., Chen, D., Pan, W., Fang, Y., Dong, C., Zheng, X., & Du, Z. (2017). Composition and bioactivity assessment of essential oils of *Curcuma longa* L. collected in China. *Industrial Crops and Products*, 109, 60–73. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2017.08.009>

Zheng, Y., Pan, C., Zhang, Z., Luo, W., Liang, X., Shi, Y., Liang, L., Zheng, X., Zhang, L., & Du, Z. (2020). Antiaging effect of *Curcuma longa* L. essential oil on ultraviolet-irradiated skin. *Microchemical Journal*, 154, 104608. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104608>