

Caracterización y cuantificación cromatográfica de carvacrol y timol en *Lippia graveolens* Kunth bajo manejo diferenciado

Characterization and chromatographic quantification of carvacrol and thymol in *Lippia graveolens* Kunth under differentiated management

Priscilla Yamilhet Montes-Orona¹ , Mercedes Georgina Ramírez-Aragón² , Ulises Noel Gutiérrez Guzmán¹ , Aaron David Lugo-Palacios¹ , Carmen Lizette Del Toro-Sánchez³ ,
Ramón Francisco Dórame-Miranda³ 

¹Universidad Juárez del Estado de Durango: Carretera Gómez Palacio - Tlahualilo Km. 32. CP. 35111, Venecia, Gómez Palacio, Durango. México.

²Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Lerdo: Av. Tecnológico N° 1555 Sur. Periférico Lerdo Km. 14.5, Plácido Domingo, CP. 35150. Ciudad Lerdo, Durango, México

³Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos (DIPA), Universidad de Sonora: Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Col. Centro, CP. 83000. Hermosillo, Sonora, México.

*Autor de correspondencia: ramon.dorame@unison.mx

Artículo científico

Recibido: 27 de febrero de 2026

Aceptado: 27 de septiembre de 2026

RESUMEN. El orégano mexicano (*Lippia graveolens* Kunth) es una especie de alto valor económico y funcional, debido a su contenido de compuestos fenólicos, principalmente carvacrol y timol, los cuales son ampliamente utilizados en las industrias alimentaria y farmacéutica. No obstante, su producción y variabilidad química están asociadas a factores de manejo agronómico y limitan la estandarización de sus derivados. Los objetivos de este estudio fueron cuantificar carvacrol y timol en la oleoresina de *L. graveolens* Kunth mediante cromatografía líquida (UHPLC-DAD), determinar su capacidad antioxidante y describir su perfil químico mediante FTIR. El orégano se obtuvo de una población semidomesticada fertilizada con diferentes dosis de vermicomposta (0, 5, 10 y 15 t ha⁻¹) y recolectada en tres fechas de corte. La oleoresina se obtuvo por maceración etanólica y se analizó mediante cromatografía. Los tiempos de retención fueron de 1.8 min para carvacrol y 1.99 min para timol. La mayor concentración de timol (75.33 µg mL⁻¹) y carvacrol (27.29 µg mL⁻¹) se registró con la dosis de 10 t ha⁻¹ en el primer corte. La capacidad antioxidante, evaluada mediante los métodos ABTS•⁺ y DPPH•, mostró diferencias significativas entre los tratamientos, destacando el tratamiento control en el primer corte. El análisis FTIR confirmó la presencia de compuestos fenólicos, terpenos y aromáticos. Por lo tanto, se concluye que la dosis de vermicomposta y la fecha de corte influyen significativamente en la composición química y la actividad antioxidante de la oleoresina, aportando información relevante para el manejo sostenible y el aprovechamiento funcional del cultivo.

Palabras clave: Compuestos bioactivos, Fenólicos, FTIR, UHPLC, Vermicomposta.

ABSTRACT. Mexican oregano (*Lippia graveolens* Kunth) is a species of high economic and functional value due to its phenolic compound content, mainly carvacrol and thymol, which are widely used in the food and pharmaceutical industries. However, its production and chemical variability are associated with agronomic management factors and limit the standardization of its derivatives. The objectives of this study were to quantify carvacrol and thymol in the oleoresin of *L. graveolens* Kunth using liquid chromatography (UHPLC-DAD), determine its antioxidant capacity, and describe its chemical profile using FT-IR. The oregano was obtained from a semi-domesticated population fertilized with different doses of vermicompost (0, 5, 10, and 15 t ha⁻¹) and harvested on three cutting dates. The oleoresin was obtained by ethanol maceration and analyzed by chromatography. The retention times were 1.8 min for carvacrol and 1.99 min for thymol. The highest concentration of thymol (75.33 µg mL⁻¹) and carvacrol (27.29 µg mL⁻¹) was recorded with the dose of 10 t ha⁻¹ in the first cut. Antioxidant capacity, evaluated by the ABTS•⁺ and DPPH• methods, showed significant differences between treatments, with the control treatment standing out in the first cut. FTIR analysis confirmed the presence of phenolic, terpene, and aromatic compounds. Therefore, it is concluded that the dose of vermicompost and the harvest date significantly influence the chemical composition and antioxidant activity of the oleoresin, providing relevant information for the sustainable management and functional use of the crop.

Keywords: Bioactive compounds, FTIR, phenolics, UHPLC, vermicompost.

Como citar: Montes-Orona PY, Ramírez-Aragón MG, Gutiérrez Guzmán UN, Lugo-Palacios AD, Del Toro-Sánchez CL, Dórame-Miranda RF (2026) Caracterización y cuantificación cromatográfica de carvacrol y timol en *Lippia graveolens* Kunth bajo manejo diferenciado. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 13(3): e5171. DOI: 10.19136/era.a13n3.5171.

INTRODUCCIÓN

El término orégano se utiliza para agrupar diversas especies de plantas aromáticas que comparten características sensoriales particulares, principalmente aroma y sabor (Galván-Calamaco *et al.* 2023). Dichas especies pertenecen principalmente a las familias *Lamiaceae* y *Verbenaceae*. Son ampliamente utilizadas como hierbas culinarias y en la medicina tradicional, debido a sus propiedades terapéuticas, entre las que destacan actividades antimicrobianas, antioxidantes y antiinflamatorias (Soto-Armenta *et al.* 2017, Nurzyńska-Wierdak y Walasek-Janusz 2025). Entre estas especies, *L. graveolens* Kunth representa una de las más importantes desde el punto de vista económico y productivo. México se posiciona como el segundo mayor proveedor mundial de orégano, de acuerdo con la Comisión del Codex Alimentarius (Reyes-Jurado *et al.* 2019, Rojas-Meléndez *et al.* 2025). El valor funcional del orégano se atribuye principalmente a su aceite esencial (AEO), compuesto mayoritariamente por monoterpenos y sesquiterpenos, siendo el timol y el carvacrol los metabolitos predominantes responsables de su aroma, sabor, bioactividad y alto valor nutricional y terapéutico (Sánchez-Tito y Layme-Huanca 2022, Torrenegra-Alarcon *et al.* 2024). Recientes investigaciones remarcan la importancia del carvacrol y timol como compuestos responsables de sus propiedades antimicrobianas (Simirgiotis *et al.* 2020), antioxidantes (Bautista-Hernández *et al.* 2021), antiinflamatorias (Fidan *et al.* 2019), antimutagénicas (da Silva *et al.* 2021) y fungicidas (Pezzani *et al.* 2017).

El AEO ha cobrado un interés creciente como aditivo natural en la industria alimentaria y pecuaria, particularmente como alternativa a los antibióticos sintéticos, cuyo uso ha sido restringido en diversas regiones (Lona-Ramírez *et al.* 2023, García-Ortega *et al.* 2024). Además del aceite esencial, los subproductos derivados de su extracción constituyen una fuente relevante de compuestos fenólicos con alto potencial antioxidante, lo que amplía el aprovechamiento integral de la biomasa vegetal (Cui *et al.* 2019, Paucarchuco-Soto *et al.* 2023). No obstante, la composición química y el rendimiento del AEO y de la oleorresina del orégano están fuertemente influenciados por factores genéticos, ambientales y agronómicos, como la especie, el manejo del cultivo, la época de cosecha, las condiciones edafoclimáticas y los métodos de secado y extracción (Calvo-Irabién *et al.* 2014, Asensio *et al.* 2015, Gerami *et al.* 2016, Napoli *et al.* 2016, Morshedloo *et al.* 2017).

En México, la producción de *L. graveolens* depende en gran medida de poblaciones silvestres, lo que genera una alta variabilidad química y limita la estandarización del producto, afectando su competitividad en el mercado (Martínez-Natarén *et al.* 2014, Llamas-Torres *et al.* 2022). La escasez de información ecofisiológica y de estrategias de manejo sostenible resalta la necesidad de desarrollar prácticas agronómicas que contribuyan a la homogeneidad química, al mismo tiempo que reduzcan la presión sobre los ecosistemas naturales (Montes-Orona *et al.* 2026). Por ello, generar información sobre perfiles fitoquímicos específicos mediante técnicas analíticas resulta fundamental para especies de alto valor como el orégano mexicano (*L. graveolens* Kunth).

En este contexto, los objetivos del presente estudio fueron: a) caracterizar la oleorresina de dicho orégano, poniendo énfasis en la determinación cuantitativa de carvacrol y timol; b) evaluar la capacidad antioxidante a partir de muestras provenientes de una población semidomesticada fertilizada con vermicomposta, como una alternativa sostenible para mejorar la calidad química y el aprovechamiento del cultivo. Esta caracterización contribuye a estandarizar la calidad, respaldar

su uso en la industria alimentaria y farmacéutica, además de aportar evidencia científica para su aprovechamiento sustentable y su potencial como fuente natural de antioxidantes y antimicrobianos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El experimento se llevó a cabo en 2024 en un sitio experimental perteneciente al Centro de Investigación en Recursos Naturales (CIRENA), ubicado a 27° 54' 09" Norte y 105° 12' 22" Oeste, en la comunidad de Salaices, municipio de López, en el estado de Chihuahua, a una altitud de 1500 metros sobre el nivel del mar. El clima es extremadamente semiárido, con una temperatura máxima de 41.7 °C y una mínima de -14.1 °C. La temperatura media anual es de 18.3 °C.

La parcela experimental permaneció sin cultivo durante cinco años previos al establecimiento del experimento. Durante este periodo no se aplicaron prácticas convencionales de manejo agrícola; sin embargo, la parcela no se consideró silvestre, sino correspondiente a una población semidomesticada. La superficie total de la parcela fue de 90 m².

Tratamientos y diseño experimental

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completamente al azar, con cuatro tratamientos y tres repeticiones, lo que resultó en un total de 12 unidades experimentales (UE). En cada UE se muestrearon, en promedio, seis plantas. Los tratamientos consistieron en la aplicación al suelo de diferentes dosis de fertilizante orgánico (humus de lombriz): T1 = 5 t ha⁻¹, T2 = 10 t ha⁻¹, T3 = 15 t ha⁻¹ y T4 = 0 t ha⁻¹, correspondiente al tratamiento control.

El establecimiento del experimento inició el 15 de mayo de 2024, con el desbroce del terreno, la caracterización del sitio y la delimitación de las unidades experimentales. La aplicación del fertilizante se efectuó el 16 de mayo de 2024 en cada unidad experimental.

La cosecha se realizó seleccionando un surco completo por UE, eligiendo el más uniforme. Se realizó un primer corte del cultivo (C1), seguido de dos cortes adicionales a los 60 (15 de julio de 2024) y 140 días (4 de octubre de 2024) posteriores a la fertilización. En cada corte, las plantas se cosecharon a una altura de 15 cm sobre el nivel del suelo con el fin de asegurar la uniformidad del experimento.

El riego se llevó a cabo mediante un sistema de riego por goteo, con una frecuencia total de riego de seis horas semanales. El fertilizante orgánico fue adquirido de GAIA Agro Orgánicos y cuenta con varias certificaciones, como OMRI (OMRI Listed®) para su uso en agricultura ecológica según las normas del Programa Nacional Ecológico (NOP) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), código de producto (aeh-19640).

Material vegetal

Se recolectó el material vegetal útil (hojas) de cada una de las muestras seleccionadas. Todas las muestras se lavaron con agua destilada y se eliminó el exceso de humedad con papel de estraza. El

secado se realizó a temperatura ambiente (25 ± 2 °C) durante 15 días. Tras la deshidratación, las muestras se molieron hasta obtener un polvo fino (Salas-Pérez *et al.* 2022).

Obtención de oleorresina

Se colocaron cinco gramos de material vegetal seco en un vaso de precipitados de 100 mL con 50 mL (1:10) de disolvente (etanol al 99,9 %). La mezcla se agitó con una placa magnética (AC-CUPLATE™ ANALOG HOTPLATE STIRRER Labnet) a temperatura ambiente durante 24 horas (Moghrovyan *et al.* 2019)

El macerado se filtró a través de papel de filtro Whatman n° 4 en un matraz Erlenmeyer. El disolvente se recuperó utilizando un destilador convencional adaptado a un baño maría para un mejor control de la temperatura. Una vez eliminado completamente el disolvente, la oleorresina se almacenó en viales ámbar de 5 mL hasta su análisis.

Productos químicos

Los solventes para HPLC (acetonitrilo HPLC y metanol HPLC) fueron de J. T. BAKER. El ácido fórmico fue de la marca EMSURE. Los estándares para HPLC, carvacrol (98%) y timol ($\leq 98.5\%$) fueron adquiridos de Sigma-Aldrich.

Análisis UHPLC-DAD

Los análisis se realizaron mediante cromatografía líquida de ultra-alta eficiencia (UHPLC) empleando un sistema Agilent 1290 Infinity II UHPLC (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) acoplado a un detector de arreglo de diodos (DAD). El equipo incluía una bomba cuaternaria de alta presión, un automuestreador con bandeja refrigerada, un compartimiento termostatzado para columna y el módulo DAD.

Se realizó una elución en gradiente a un caudal de $0,3 \text{ mL min}^{-1}$ utilizando ácido fórmico al 0.1% en agua (disolvente A) y acetonitrilo (disolvente B) para llevar a cabo una primera limpieza y eliminar residuos de compuestos presentes en la columna. El perfil del gradiente se detalla en la Tabla 1. Después de la ejecución, el sistema se lavó por segunda vez con 100% de solvente B durante 10 minutos para limpiar la columna y luego se volvió a equilibrar a las condiciones iniciales.

Tabla 1. Gradiente para la limpieza de columna en UHPLC-DAD

Tiempo (min)	A (%)	B (%)	Flujo (mL min^{-1})	Lim. de presión max (bar)
0.00	100.00	0.00	0.300	800.00
15.00	80.00	20.00	0.300	800.00
15.00	60.00	40.00	0.300	800.00
15.00	20.00	80.00	0.300	800.00
15.00	0.00	100.00	0.300	800.00

La detección se llevó a cabo registrando espectros UV-Vis completos en el rango típico de 200-900 nm con adquisición de múltiples longitudes de onda para identificar y cuantificar los compuestos objetivo, extrayendo 274 nm como longitud óptima para los cromatogramas. La instrumentación fue controlada mediante software especializado (Agilent OpenLAB) para la adquisición de datos y

el procesamiento de los espectros cromatográficos. Los parámetros cromatográficos, columna (ZORBAX Eclipse Plus C18 2.1 x 50 mm 1.8 μm), la fase móvil (una combinación isocrática de acetonitrilo (ACN):H₂O (50:50) con un caudal de 0.3 mL min⁻¹), el volumen de inyección para todas las muestras y soluciones estándar (10 μL), gradiente y temperatura (24-26 °C), se optimizaron para la separación eficiente de los analitos de interés, conforme a un método validado de cromatografía líquida de alta resolución para el análisis de timol y carvacrol en aceite de *Thymus vulgaris* L. (Hajimehdipoor *et al.* 2010).

Cuantificación de timol y carvacrol

Se añadieron 150 μL de solución madre a una concentración conocida de 10 μg oleorresina/mL ACN:H₂O 80:20. Se prepararon 12 muestras y cada muestra se analizó por triplicado. Se prepararon soluciones madre de timol (3 mg mL⁻¹) y carvacrol (1 mg mL⁻¹) en disolvente ACN:H₂O (80:20). Se diluyeron las soluciones madre en diferentes concentraciones (15-90 μg mL⁻¹ para timol y 2-10 μg mL⁻¹ para carvacrol) para trazar las curvas de calibración de timol y carvacrol.

Se evaluó la linealidad mediante la relación entre la concentración de timol y carvacrol, y la absorbancia del detector DAD-HPLC. El coeficiente de determinación (r^2) se calculó mediante el análisis de mínimos cuadrados. La recta de calibración se obtuvo mediante tres réplicas de cada concentración de timol o carvacrol.

Los límites de detección (LOD) y los límites de cuantificación (LOQ) se calcularon utilizando las expresiones $3.3 \sigma/s$ y $10 \sigma/s$, respectivamente, donde σ es la desviación estándar del origen y s es la pendiente de la curva de calibración (ICH 1996, Shekarchi *et al.* 2010).

Evaluación de la capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se evaluó mediante los ensayos ABTS•⁺ y DPPH• con un lector de microplacas VeloScan™ LUX (Thermo Scientific) y placas de 96 pocillos. Se utilizó etanol absoluto como blanco en ambos ensayos. Se realizaron diluciones de la muestra en concentraciones conocidas (mg mL⁻¹). Para el ensayo ABTS•⁺ adaptado de Re *et al.* (1999), los antioxidantes del extracto neutralizan el radical catiónico ABTS•⁺ generado por la oxidación con persulfato de potasio. La reacción se inició mezclando 20 μL de extracto con 280 μL de solución ABTS•⁺, seguida de una incubación durante 7 minutos a 25 °C en la oscuridad, y se midió la absorbancia a 734 nm. Los resultados se expresaron como IC₅₀ en concentración de mg mL⁻¹.

Para el método DPPH•, adaptado de Palafox-Carlos *et al.* (2012), se mezclaron 20 μL de extracto con 280 μL de solución DPPH• en metanol (0,1 mM), se incubó durante 30 minutos en la oscuridad a temperatura ambiente y se midió la absorbancia a 515 nm. Los resultados se expresaron como IC₅₀ en concentración de mg mL⁻¹.

Medición FTIR

El extracto se analizó utilizando espectroscopia FTIR dentro del rango de 4 000-400 cm⁻¹, utilizando un accesorio ATR (Attenuated Total Reflectance) PIKE GladiATR montado en un espectrofotómetro FTIR PerkinElmer Frontier. Se registró un espectro con un blanco (etanol) antes de realizar la medición para eliminar cualquier tipo de interferencia. Para su análisis se colocó una muestra de extracto en el portamuestras. El instrumento realizó el espectro y los resultados se

reportaron como transmitancia frente al número de onda (cm^{-1}) para la identificación del grupo funcional.

Análisis estadístico

Los datos se expresan como media $\pm$ DE de tres réplicas. Se verificó la normalidad y la homogeneidad de la varianza antes del ANOVA. Se utilizó el software de análisis estadístico (SAS) versión 9.0 con el ANOVA de dos vías. Se utilizaron pruebas LSD ($p < 0,05$) para determinar las diferencias entre los tratamientos (dosis de fertilización/corte). Las figuras se crearon con SigmaPlot versión 12.0 y Origin Pro, versión 9.0 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA).

RESULTADOS

Desarrollo del método en UHPLC-DAD

Se utilizó una fase móvil de ACN:H₂O (50:50) en modo isocrático para lograr la máxima separación. El caudal se ajustó a 0.3 mL min^{-1} . El caudal de 0.3 mL min^{-1} proporcionó una relación señal/ruido óptima con un tiempo de separación de menos de 10 min. Los tiempos de retención para el carvacrol y el timol fueron de 1.8 ± 0.1 y 1.99 ± 0.1 min, respectivamente. Los compuestos se monitorizaron a una longitud de onda de 274 nm utilizando un detector de matriz de fotodiodos. Se detectaron otros compuestos en cantidades menores que podrían considerarse trazas. Además, se observaron picos no identificados, que podrían corresponder a polifenoles comunes en la especie *L. graveolens* Kunth y un pico inicial que fue considerado frente del solvente.

En total, se identificaron y cuantificaron los compuestos principales reportados para esta especie, carvacrol y timol, utilizando estándares conocidos para la calibración (Figura 1). La separación cromatográfica depende principalmente de la polaridad y de las interacciones de los analitos con la fase estacionaria y móvil. Debido a que carvacrol y timol son isómeros estructurales, presentan propiedades fisicoquímicas similares, lo que explica la cercanía en sus tiempos de retención. Sin embargo, diferencias en la posición del grupo hidroxilo (-OH) generan variaciones estéricas y en su afinidad por la fase estacionaria, por lo que el timol puede mostrar un comportamiento ligeramente más hidrofóbico y, en consecuencia, diferencias sutiles en su elución.

Procedimiento de validación

Los resultados obtenidos de la validación del método para el ensayo de timol y carvacrol, en cuanto a linealidad, selectividad, precisión y exactitud, demostraron la fiabilidad del método (Tabla 2).

Se obtuvo una excelente linealidad para el timol y el carvacrol entre las áreas de los picos y las concentraciones de $15\text{-}90 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$ con $r^2 = 0.9972$ para el timol y de $2\text{-}10 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$ con $r^2 = 0.9741$ para el carvacrol. Los límites de detección (LOD) y de cuantificación (LOQ) se calcularon en 5.66 y $17.17 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$, y 2.37 y $7.20 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$ para el timol y el carvacrol, respectivamente.

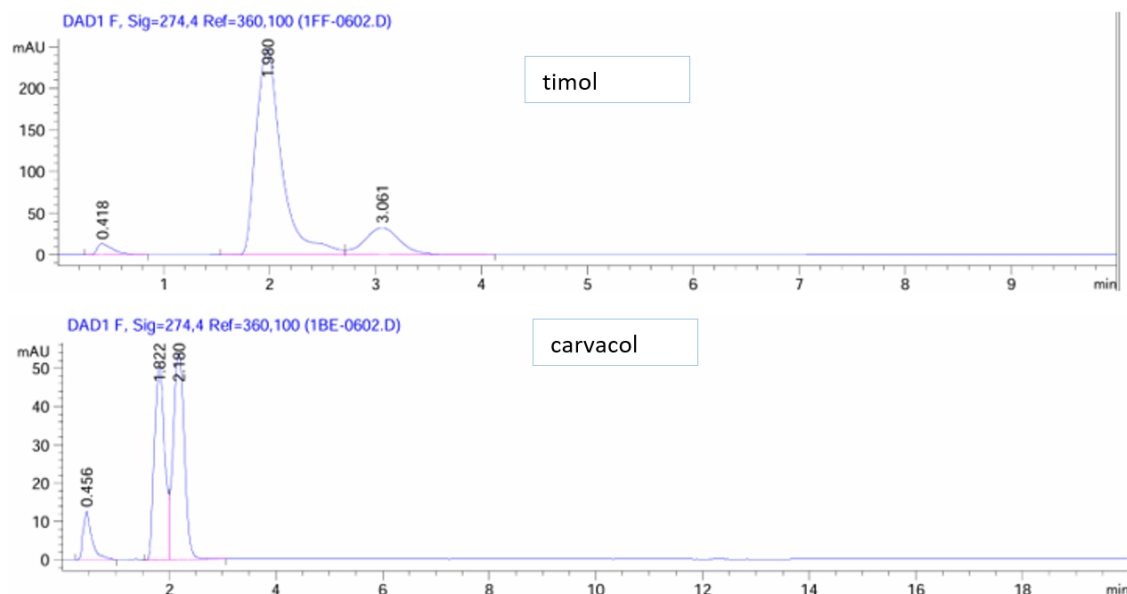


Figura 1. Cromatogramas UHPLC-DAD de los estándares fenólicos timol y carvacrol.

Tabla 2. Factores de validación del método UHPLC-DAD para la cuantificación de timol y carvacrol en oleorresina de *L. graveolens* Kunth.

Parámetros	Timol	Carvacrol
LOD ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	5.66	2.37
LOQ ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	17.17	7.20
Linealidad (r^2)	0.99	0.97
Rango ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	15-90	2-10

LOD = Límite de detección (Limit of detection); LOQ = Límite de cuantificación (Limit of Quantification); R^2 = Coeficiente de determinación.

Determinación de timol y carvacrol

Se analizaron las doce muestras de oleorresinas previamente preparadas, siguiendo la metodología descrita anteriormente. El contenido de timol y carvacrol en cada muestra se cuantificó mediante la ecuación de la recta obtenida a partir de las curvas de calibración correspondientes a cada compuesto (Tabla 3).

En general, el timol se presentó como el compuesto mayoritario en todas las muestras, con valores que oscilaron entre 28.34 y 75.33 $\mu\text{g mL}^{-1}$ de extracto. El mayor contenido de timol se observó en la muestra T2C1 del tratamiento de 10 t ha⁻¹ con 75.33 $\mu\text{g mL}^{-1}$, lo cual sugiere que la dosis intermedia de fertilización favoreció la acumulación de este metabolito. En el caso del carvacrol, los valores fueron menores, variando entre 0.18 y 27.29 $\mu\text{g mL}^{-1}$. La mayor concentración se registró también en la muestra T2C1 (10 t ha⁻¹).

Capacidad antioxidante mediante los métodos DPPH• y ABTS•+

Los resultados mostraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Figuras 2 y 3). Para IC₅₀- DPPH• e IC₅₀- ABTS•+ el tratamiento testigo (0 t ha⁻¹) en el primer corte mostró el

valor más bajo. Sin embargo, en el corte 2 este efecto no fue estadísticamente diferente. Esto podría explicarse por procesos de adaptación de la planta; en condiciones de estrés, las plantas silvestres pueden generar metabolitos secundarios como mecanismo de defensa ante situaciones de estrés biótico o abiótico.

Tabla 3. Contenido de timol y carvacrol en cada muestra analizada por UHPLC-DAD.

Código	Tratamiento	Timol $\mu\text{g mL}^{-1}$ extracto	Carvacrol $\mu\text{g mL}^{-1}$ extracto
T1C1	5 t ha ⁻¹	41.77	10.06
T2C1	10 t ha ⁻¹	75.33	27.29
T3C1	15 t ha ⁻¹	41.86	11.01
T4C1	0 t ha ⁻¹	44.78	12.87
T1C2	5 t ha ⁻¹	42.20	6.74
T2C2	10 t ha ⁻¹	54.16	7.30
T3C2	15 t ha ⁻¹	53.43	10.17
T4C2	0 t ha ⁻¹	53.03	4.50
T1C3	5 t ha ⁻¹	28.34	0.18
T2C3	10 t ha ⁻¹	72.66	10.21
T3C3	15 t ha ⁻¹	38.01	1.78
T4C3	0 t ha ⁻¹	55.60	6.10

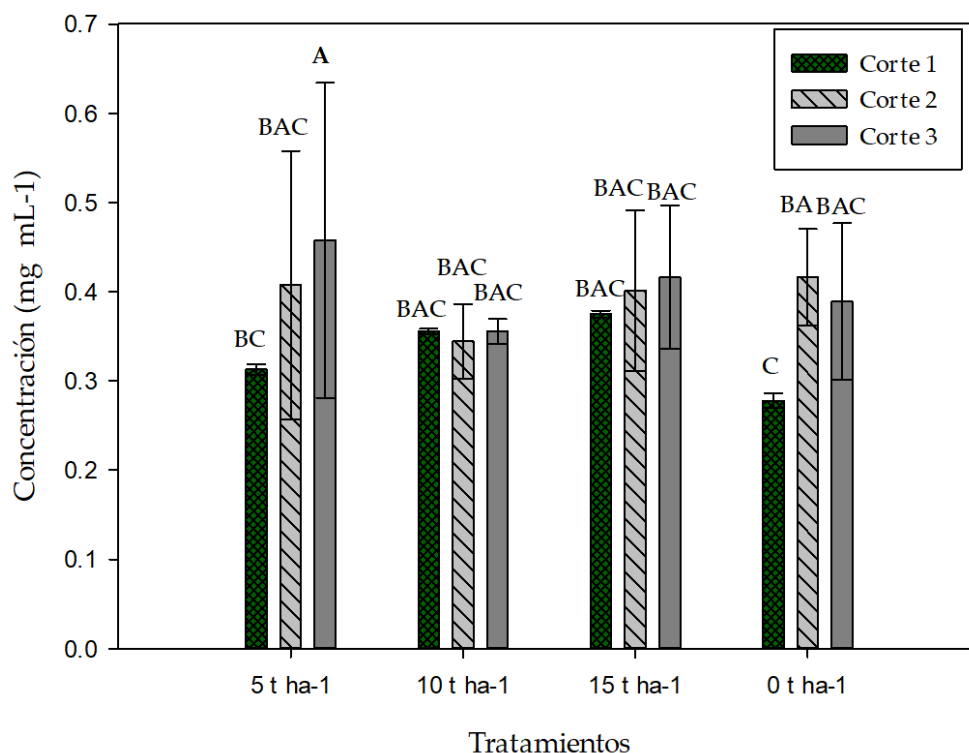


Figura 2. Valores medios de IC₅₀ obtenidos para la capacidad antioxidante por el método de DPPH•. Los valores presentados son las medias $\pm$ 1 D.E. Las letras diferentes sobre los histogramas indican diferencias estadísticamente significativas utilizando la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) a $p \leq 0,05$ entre los valores medios de los diferentes tratamientos en las 3 fechas de corte.

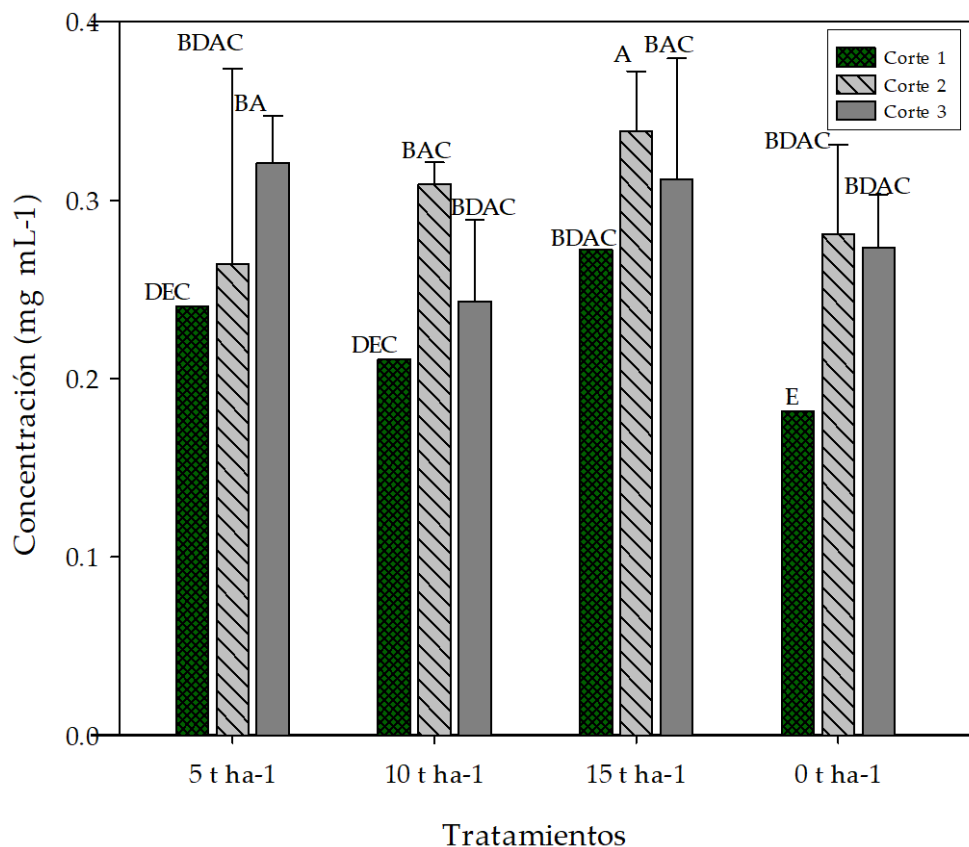


Figura 3. Valores medios de IC₅₀ obtenidos para la capacidad antioxidante por el método de ABTS•⁺. Los valores presentados son las medias $\pm$ 1 D.E. Las letras diferentes sobre los histogramas indican diferencias estadísticamente significativas utilizando la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) a $p \leq 0,05$ entre los valores medios de los diferentes tratamientos en las 3 fechas de corte.

Los valores más bajos de IC₅₀ indican una mayor capacidad antioxidante, ya que se requiere una cantidad menor de extracto para eliminar el 50% de los radicales DPPH•. Por otra parte, las diferencias observadas en los valores de IC₅₀ entre los métodos DPPH• y ABTS•⁺ pueden atribuirse a las características químicas de cada radical y a la composición del extracto, ya que el DPPH• es más selectivo hacia antioxidantes de naturaleza lipofílica o moderadamente polar, mientras que ABTS•⁺ reacciona con compuestos tanto hidrofílicos como lipofílicos. Por ello, las variaciones entre tratamientos y cortes podrían estar asociadas a cambios en el perfil de metabolitos antioxidantes, especialmente en la proporción de compuestos fenólicos y monoterpenos como timol y carvacrol, los cuales pueden modificarse por efecto del estado fisiológico de la planta, condiciones ambientales y disponibilidad nutrimental, sugiriendo que la fertilización influyó no solo en la cantidad total de antioxidantes sino también en su composición química.

Composición química de la oleorresina por FTIR

La figura 4 muestra el espectro FTIR de la oleorresina de orégano y permite identificar la presencia de los grupos funcionales característicos de moléculas con capacidad antioxidante, tales como fenoles, polifenoles y flavonoides.

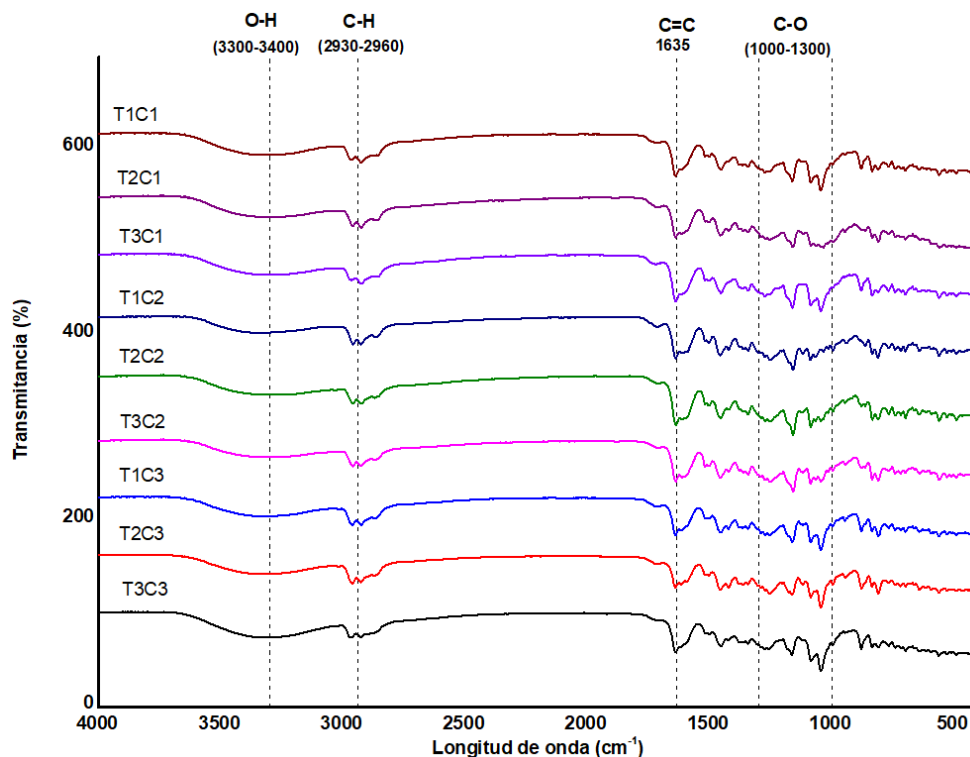


Figura 4. Espectro FTIR de la oleorresina de *L. graveolens* Kunth, con presencia de compuestos bioactivos como fenoles/alcoholes (3 300-3 400 cm^{-1}), terpenos (2 925-2 960 cm^{-1}), aromáticos/alquenos (1 635 cm^{-1}) y fenoles/éteres (1 000-1 300 cm^{-1}).

La figura 4 presenta nueve muestras diferentes de extractos de orégano correspondientes a los tratamientos con vermicomposta T1, T2 y T3, evaluados en los tres cortes (C1, C2 y C3). Se pueden observar picos de absorbancia prominentes principalmente en la región de 1 800-800 cm^{-1} . La presencia de grupos hidroxilo (O-H) en todas las muestras confirma la naturaleza fenólica de los compuestos predominantes, que son responsables de muchas de las propiedades medicinales del orégano. Todas las muestras exhiben perfiles espectrales similares, lo que confirma que contienen los mismos tipos de compuestos, pero en diferentes proporciones. Aunque el experimento comprendió cuatro tratamientos por tres cortes (12 combinaciones), el análisis FTIR se realizó únicamente como una caracterización cualitativa complementaria de los extractos obtenidos bajo fertilización orgánica.

DISCUSIÓN

La caracterización de la oleorresina de *L. graveolens* Kunth analizada mediante UHPLC-DAD permitió cuantificar con precisión los compuestos fenólicos de interés (carvacrol y timol). Estas moléculas son los principales compuestos a los que se les atribuyen sus efectos biológicos en las oleorresinas y extractos. Las metodologías cromatográficas actuales, incluidas adaptaciones de UHPLC, han demostrado ser robustas para la cuantificación de timol y carvacrol en matrices complejas como oleorresinas y aceites esenciales, reportando límites de detección y cuantificación adecuados para aplicaciones fitoquímicas cuantitativas. Por ejemplo, métodos convencionales

basados en HPLC han mostrado linealidades altas ($R^2 > 0.99$) y límites de detección bajos para carvacrol y timol en hojas de orégano, lo que respalda la validez analítica de cuantificación en oleorresinas adaptadas para UHPLC-DAD en el presente estudio (Valdez-Baro *et al.* 2025).

Perfil de carvacrol y timol

Los perfiles cuantitativos de carvacrol y timol obtenidos en esta oleorresina concuerdan con patrones reportados en aceites esenciales de orégano mexicano, en los cuales carvacrol y timol suelen ser los constituyentes mayoritarios (Cid-Pérez *et al.* 2019). De manera similar, Calva-Cruz *et al.* (2021) caracterizaron oleorresinas de *L. graveolens* obtenidas mediante CO₂ supercrítico y reportaron a carvacrol y timol como metabolitos predominantes, confirmando su utilidad como marcadores químicos para la caracterización de estos derivados. En *Poliomintha longiflora*, carvacrol y timol representaron proporciones significativas de la composición total, aunque la relación específica varió entre estudio y población, lo que sugiere variabilidad influenciada por factores ambientales y genéticos (Mora-Zúñiga *et al.* 2022).

Respecto a la determinación cuantitativa, existen diferencias significativas entre tratamientos. El tratamiento de 10 t ha⁻¹ mostró el mayor contenido de timol y carvacrol. Este resultado indica que la fertilización puede modular la síntesis de compuestos fenólicos en orégano, lo que coincide con Matlok *et al.* (2020). En general, los resultados concuerdan con lo reportado en estudios que destacan la importancia de estos compuestos para actividades funcionales de extractos de orégano y otras especies aromáticas, los cuales han observado que el carvacrol y timol contribuyen de manera sinérgica a la capacidad antioxidante y a otras actividades biológicas (Sun *et al.* 2025).

Capacidad antioxidante

La evaluación de la capacidad antioxidante reveló una actividad significativa de la oleorresina. En ambas metodologías (ABTS•⁺ y DPPH•) los resultados mostraron diferencias estadísticas significativas (Figuras 2 y 3), siendo el tratamiento de 0 t ha⁻¹ (testigo) en el corte 1 el que obtuvo el valor más bajo para IC₅₀, 0.27 mg mL⁻¹ para DPPH• y 0.18 mg mL⁻¹ para ABTS•⁺, valores similares a los reportados por Soto *et al.* (2024) en extractos acuosos de *L. graveolens*, lo que sugiere que la falta de fertilización indujo un estrés nutricional moderado, aumentando la síntesis de compuestos antioxidantes y la actividad de eliminación de radicales (Lattanzio *et al.* 2009). Esta tendencia concuerda con numerosos estudios que relacionan contenidos elevados de monoterpenos fenólicos con mayor actividad antioxidante en orégano y derivados. En aceites esenciales de *Origanum spp.*, los ensayos DPPH• y FRAP han mostrado actividades comparables a antioxidantes de referencia, lo cual refleja la contribución de carvacrol y timol a la neutralización de radicales libres (Silva-Vazquez *et al.* 2017).

Estos resultados respaldan la hipótesis de que el estrés moderado (como la escasez de nutrientes) estimula la producción de metabolitos secundarios. Los estudios sobre el orégano también han demostrado que las dosis elevadas de fertilización reducen la capacidad antioxidante (Sęczyk *et al.* 2020). Los resultados sugieren que las dosis moderadas de vermicomposta pueden promover la síntesis de antioxidantes, posiblemente mejorando la disponibilidad de nutrientes y estimulando la actividad microbiana del suelo, como señalan Manzoor *et al.* (2024) y Yusof *et al.* (2018).

No obstante, el hecho de que los valores más bajos de IC₅₀ no coincidieran necesariamente con las mayores concentraciones de timol y carvacrol sugiere que la capacidad antioxidante de las oleorresinas no depende únicamente de estos compuestos mayoritarios. La actividad antioxidante de los aceites esenciales está influenciada por la complejidad de su composición química, y diversos metabolitos fenólicos minoritarios presentes en el extracto pueden contribuir de forma significativa a la neutralización de radicales libres, así como interactuar de manera aditiva o sinérgica con los principales componentes (Chroho *et al.* 2024).

Espectroscopía FTIR

Esta técnica de alta resolución genera un espectro de reflexión de los grupos funcionales, permitiendo la identificación precisa de sustancias orgánicas e inorgánicas (Pasieczna-Patkowska *et al.* 2025). El análisis del espectro FTIR mostró la presencia de diversos compuestos fitoquímicos bioactivos. Los espectros de FTIR fueron comparados con espectros publicados anteriormente de aceites esenciales de orégano. Los picos característicos coinciden con un espectro de aceite esencial de orégano previamente publicado por Sander *et al.* (2024). La banda correspondiente al estiramiento O-H sugiere la presencia de grupos hidroxilo y fenólicos, los cuales son característicos de flavonoides y ácidos fenólicos (Marín-Tinoco *et al.* 2023). Asimismo, las señales asociadas al estiramiento C-H de cadenas alifáticas se relacionan con la presencia de terpenoides (Bautista-Hernández *et al.* 2021). En el espectro también se identifican vibraciones esqueléticas del anillo aromático, comúnmente atribuidas a compuestos flavonoides. Por otra parte, el estiramiento C-O se asocia con éteres y alcoholes fenólicos (Bernal-Millán *et al.* 2022, Marín-Tinoco *et al.* 2023). En conjunto, estas características espectrales están estrechamente vinculadas con moléculas orgánicas que le confieren propiedades bioactivas al extracto.

Influencia de la vermicomposta sobre la composición y actividad

Si bien la literatura específica sobre el efecto de la vermicomposta en la producción de carvacrol y timol en orégano es limitada, estudios generales muestran que la vermicomposta puede modificar la fisiología y la biosíntesis de metabolitos secundarios en plantas aromáticas y hortícolas, afectando parámetros como la proliferación de terpenoides y fenoles (Rehman *et al.* 2023). Este efecto podría estar vinculado a un aumento en la disponibilidad de nutrientes, al estímulo de microorganismos benéficos del suelo o a la modulación de rutas biosintéticas de compuestos secundarios mediante fitohormonas naturalmente presentes en la vermicomposta.

CONCLUSIONES

El manejo agronómico mediante vermicomposta y la fecha de corte modulan de forma significativa la composición fitoquímica y la actividad antioxidante de la oleorresina de *L. graveolens* Kunth. La cuantificación por UHPLC-DAD estableció perfiles cromatográficos precisos para carvacrol y timol, identificando una concentración máxima bajo la aplicación de 10 t ha⁻¹ en el primer corte, lo que evidencia una respuesta metabólica diferenciada asociada a la fertilización orgánica. Asimismo, los ensayos ABTS•⁺ y DPPH• confirmaron variaciones significativas en la capacidad antioxidante entre tratamientos, mientras que el análisis FTIR corroboró la presencia de estructuras

fenólicas y terpenoides coherentes con el perfil bioactivo observado. En conjunto, los resultados aportan evidencia experimental para comprender la relación entre manejo edáfico y acumulación de monoterpenos fenólicos en orégano mexicano, contribuyendo a la estandarización química y funcional de sus derivados con enfoque agroindustrial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación. Asimismo, se agradece al Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales por el respaldo académico brindado, así como al Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora, por el asesoramiento técnico y el acceso a sus instalaciones, que permitieron la realización de los distintos análisis experimentales.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

- Asensio CM, Grosso NR, Juliani HR (2015) Quality characters, chemical composition and biological activities of oregano (*Origanum spp.*) essential oils from central and southern Argentina. *Industrial Crops and Products* 63: 203-213. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.09.056>
- Bautista-Hernández I, Aguilar CN, Martínez-Ávila GCG, Torres-León C, Iliana A, Flores-Gallegos AC, Verma DK, Chávez-González ML (2021) Mexican oregano (*Lippia graveolens* Kunth) as source of bioactive compounds: A review. *Molecules* 26: 5156. <https://doi.org/10.3390/molecules26175156>
- Bernal-Millán MDJ, Gutiérrez-Grijalva EP, Contreras-Angulo L, Muy-Rangel MD, López-Martínez LX, Heredia JB (2022) Spray-dried microencapsulation of oregano (*Lippia graveolens*) polyphenols with maltodextrin enhances their stability during *in vitro* digestion. *Journal of Chemistry* 2022: 8740141. <https://doi.org/10.1155/2022/8740141>
- Calva-Cruz OJ, Badillo-Larios NS, De León-Rodríguez A, Espitia-Rangel E, González-García R, Turrubiartes-Martínez EA, Castro-Gallardo A, Barba-de-la-Rosa AP (2021) *Lippia graveolens* HBK oleoresins, extracted by supercritical fluids, showed bactericidal activity against multidrug resistance *Enterococcus faecalis* and *Staphylococcus aureus* strains. *Drug Development and Industrial Pharmacy* 47(10): 1546-1555. <https://doi.org/10.1080/03639045.2021.2008417>
- Calvo-Irabién LM, Parra-Tabla V, Acosta-Arriola V, Escalante-Erosa F, Díaz-Vera L, Dzib GR, Peña-Rodríguez LM (2014) Essential oils of Mexican oregano (*Lippia graveolens* Kunth) populations along an edapho-climatic gradient. *Journal of Chemical Biodiversity* 11: 1010-1021. <https://doi.org/10.1002/cbdv.201300389>
- Chroho M, Roupheal Y, Petropoulos SA, Bouissane L (2024) Carvacrol and thymol content affects the antioxidant and antibacterial activity of *Origanum compactum* and *Thymus zygis* essential oils. *Antibiotics* 13(2): 139. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13020139>

- Cid-Pérez TS, Ávila-Sosa R, Ochoa-Velasco CE, Rivera-Chavira BE, Nevárez-Moorillón GV (2019) Antioxidant and antimicrobial activity of Mexican oregano (*Poliomintha longiflora*) essential oil, hydrosol and extracts from waste solid residues. *Plants* 8(1): 22. <https://doi.org/10.3390/plants8010022>
- Cui H, Zhang C, Li C, Lin L (2019) Antibacterial mechanism of oregano essential oil. *Industrial Crops and Products* 139: 111498. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111498>
- Da Silva LRR, Ferreira OO, Cruz JN, Franco CDP, Dos Anjos TO, Cascaes MM, Da Costa WA, De Aguiar Andrade EH, De Oliveira MS (2021) *Lamiaceae* essential oils: phytochemical profile, antioxidant, and biological activities. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine* 2021: 6748052. <https://doi.org/10.1155/2021/6748052>
- Fidan H, Stankov S, Ivanova T, Stoyanova A, Damyanova S, Ercisli S (2019) Characterization of aromatic compounds and antimicrobial properties of four spice essential oils from family *Lamiaceae*. *Ukrainian Food Journal* 8: 227-238. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2019-8-2-3>
- Galván-Calamaco Z, Ramos-Clamont-Montfort G, Marszalek JE, Vargas-González G (2023) Revisión sobre el orégano mexicano *Lippia graveolens* HBK. (Sinonimia *Lippia berlandieri* Schauer) y su aceite esencial. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos* 8(1): 861-871. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.109>
- García-Ortega MG, Lucas-Resabala DE, Campozano-Marcillo GA (2024) Adición de *Origanum vulgare* en la alimentación de pollos de engorde. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS* 6(2): 175-183. <https://doi.org/10.59169/pentaciencias.v6i2.1035>
- Gerami F, Moghaddam PR, Ghorbani R, Hassani A (2016) Effects of irrigation intervals and organic manure on morphological traits, essential oil content and yield of oregano (*Origanum vulgare* L.). *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 88: 2375-2385. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201620160208>
- Hajimehdipoor H, Shekarchi M, Khanavi M, Adib N, Amri M (2010) A validated high performance liquid chromatography method for the analysis of thymol and carvacrol in *Thymus vulgaris* L. volatile oil. *Pharmacognosy Magazine* 6: 154-158. <https://doi.org/10.4103/0973-1296.66927>
- ICH (1996) Validation of analytical procedures: methodology (ICH Topic Q2B, CPMP/ICH/281/95). International Conference on Harmonisation. London: 1-13
- Lattanzio V, Cardinali A, Ruta C, Fortunato I, Lattanzio V, Linsalata V (2009) Relationship of secondary metabolism to growth in oregano (*Origanum vulgare* L.) shoot cultures under nutritional stress. *Environmental and Experimental Botany* 65: 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.09.002>
- Llamas-Torres I, Grijalva-Arango R, Porter-Bolland L, Calvo-Irabién LM (2022) Impact of the in situ-ex situ management of Mexican oregano (*Lippia origanoides* Kunth) in northwestern Yucatán. *Botanical Sciences* 100: 610-630. <https://doi.org/10.17129/botsci.2994>
- Lona-Ramírez FJ, Hernández-López NL, González-Alatorre G, Flores-Flores TC, Patiño-Herrera R, Louvier-Hernández JF (2023) Determination of thymol and carvacrol in an organic swine feed matrix using Headspace SPME-GC-MS. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 14: 78-93. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v14i1.5394>
- Manzoor A, Naveed MS, Ali RMA, Naseer MA, Ul-Hussan M, Saqib M, Hussain S, Farooq M (2024) Vermicompost: A potential organic fertilizer for sustainable vegetable cultivation. *Scientia Horticulturae* 336: 113443. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113443>
- Marín-Tinoco RI, Ortega-Ramírez AT, Esteban-Mendez M, Silva-Marrufo O, Barragan-Ledesma LE, Valenzuela-Núñez LM, Briceño-Contreras EA, Sariñana-Navarrete MA, Camacho-Luis A, Navarrete-Molina C (2023) Antioxidant and antibacterial activity of Mexican oregano essential oil, extracted from plants occurring naturally in semiarid areas and cultivated in the field and greenhouse in Northern Mexico. *Molecules* 28(18): 6547. <https://doi.org/10.3390/molecules28186547>

- Martínez-Natarén DA, Parra-Tabla V, Ferrer-Ortega MM, Calvo-Irabién LM (2014) Genetic diversity and structure in wild populations of Mexican oregano (*Lippia graveolens* HBK) and its relationship with essential oil composition. *Plant Systematics and Evolution* 300: 535–547. <https://doi.org/10.1007/s00606-013-0902-y>
- Matłok N, Stępień AE, Gorzelany J, Wojnarowska-Nowak R, Balawejder M (2020) Effects of organic and mineral fertilization on yield and selected quality parameters for dried herbs of two varieties of oregano (*Origanum vulgare* L.). *Applied Sciences* 10(16): 5503. <https://doi.org/10.3390/app10165503>
- Moghrovy A, Sahakyan N, Babayan A, Chichoyan N, Petrosyan M, Trchounian A (2019). Essential oil and ethanol extract of oregano (*Origanum vulgare* L.) from Armenian flora as a natural source of terpenes, flavonoids and other phytochemicals with antiradical, antioxidant, metal chelating, tyrosinase inhibitory and antibacterial activity. *Current Pharmaceutical Design* 25(16): 1809–1816. <https://doi.org/10.2174/1381612825666190702095612>
- Montes-Orona PY, Ramírez-Aragón MG, Villalpando-De la Torre I, Nava-Camberos U, Cenicerós-García J, García-Hernández JL (2026) Determination of bioactive potential in a semi-domesticated population of oregano (*Lippia graveolens* Kunth) with organic fertilization. *Phyton - International Journal of Experimental Botany* 95(2): 1-12. <https://doi.org/10.32604/phyton.2026.074379>
- Mora-Zúñiga AE, Treviño-Garza MZ, Amaya Guerra CA, Galindo Rodríguez SA, Castillo S, Martínez-Rojas E, Rodríguez-Rodríguez J, Báez-González JG (2022) Comparison of chemical composition, physicochemical parameters, and antioxidant and antibacterial activity of the essential oil of cultivated and wild Mexican oregano *Poliomintha longiflora* Gray. *Plants* 11(14): 1785. <https://doi.org/10.3390/plants11141785>
- Morshedloo MR, Craker LE, Salami A, Nazeri V, Sang H, Maggi F (2017) Effect of prolonged water stress on essential oil content, compositions and gene expression patterns of mono- and sesquiterpene synthesis in two oregano (*Origanum vulgare* L.) subspecies. *Plant Physiology and Biochemistry* 111: 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.11.023>
- Napoli E, Mazzaglia A, Restuccia C, Ragni P, Lanza CM, Ruberto G (2016) The effect of γ -irradiation on chemical composition, microbial load and sensory properties of Sicilian oregano. *LWT - Food Science and Technology* 72: 566-572. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.05.025>
- Nurzyńska-Wierdak R, Walasek-Janusz M (2025) Chemical composition, biological activity, and potential uses of oregano (*Origanum vulgare* L.) and oregano essential oil. *Pharmaceuticals* 18(2): 267. <https://doi.org/10.3390/ph18020267>
- Rojas-Meléndez R, Robledo-Torres V, García-Osuna H, Mendoza-Villarreal R, Sandoval-Rangel A (2025) Biomasa y minerales en *Lippia graveolens* bajo tres ambientes de producción en General Cepeda. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 16(1): e3214. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i1.3214>
- Palafox-Carlos H, Yahia EM, González-Aguilar GA (2012) Identification and quantification of phenolic compounds from mango (*Mangifera indica* cv. Ataulfo) by HPLC–DAD–MS/MS–ESI. *Food Chemistry* 135: 105–111. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.04.103>
- Pasieczna-Patkowska S, Cichy M, Flieger J (2025) Application of fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy in characterization of green synthesized nanoparticles. *Molecules* 30(3): 684. <https://doi.org/10.3390/molecules30030684>
- Paucarchuco-Soto J, Torres-Gutiérrez ER, Javier-Ninahuaman HJ, Vilchez-De-la-Cruz JE (2023) Aceites esenciales: interés agroindustrial por los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de plantas aromáticas. *Advances in Science and Innovation* 2(2): 10-19. <https://doi.org/10.61210/asi.v2i2.65>
- Pezzani R, Vitalini S, Iriti M (2017) Bioactivities of *Origanum vulgare* L.: An update. *Phytochemistry Reviews* 16: 1253-1268. <https://doi.org/10.1007/s11101-017-9535-z>

- Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C (1999) Antioxidant activity applying an improved ABTS•⁺ radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine* 26: 1231-1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Rehman SU, De Castro F, Aprile A, Benedetti M, Fanizzi FP (2023) Vermicompost: Enhancing plant growth and combating abiotic and biotic stress. *Agronomy* 13(4): 1134. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041134>
- Reyes-Jurado F, Cervantes-Rincón T, Bach H, López-Malo A, Palou E (2019) Antimicrobial activity of Mexican oregano (*Lippia berlandieri*), thyme (*Thymus vulgaris*), and mustard (*Brassica nigra*) essential oils in gaseous phase. *Industrial Crops and Products* 131: 90-95. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.036>
- Salas-Pérez L, Moncayo-Lujan MR, Borroel-García VJ, Guzmán-Silos TL, Ramírez-Aragón MG (2022). Composición fitoquímica y actividad antioxidante en tres variedades de albahaca por efecto de distintos solventes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13(28): 113-123. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3267>
- Sánchez-Tito MA, Layme-Huanca MR (2022) Composición química y actividad antibacteriana del aceite esencial de *Origanum vulgare* L. frente a *Enterococcus faecalis*. *Revista Cubana de Estomatología* 59(1): e3457.
- Sander A, Bival-Štefan M, Radetić A, Petračić A, Kučić-Grgić D, Cvetnić M, Parlov-Vuković J (2024) Advanced Spectroscopic Characterization, Antioxidant and Antibacterial Activity Evaluation, and Trace Metal Analyses of Essential Oils from Star Anise, Nutmeg, Clove, Oregano, Bay Leaves, and Lemon Peel. *Applied Sciences*, 14(23), 11094. <https://doi.org/10.3390/app142311094>
- SAS Institute Inc. (2009) SAS/STAT 9.2 User's Guide. Second Edition. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Sęczyk Ł, Król B, Kołodziej B (2020) *In vitro* bioaccessibility and activity of Greek oregano (*Origanum vulgare* L. ssp. *hirtum* (Link) Ietswaart) compounds as affected by nitrogen fertilization. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 100(6): 2410-2417. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10252>
- Shekarchi M, Hajimehdipoor H, Khanavi M, Adib N, Bozorgi M, Akbari-Adergani B (2010) A validated method for analysis of swerchirin in *Swertia longifolia* by high performance liquid chromatography. *Pharmacognosy Magazine* 6: 13-18. <https://doi.org/10.4103/0973-1296.59961>
- Silva-Vazquez R, Duran-Melendez LA, Mendez-Zamora G, Estrada ES, Xie M, Turgut-Dunford, Goad Carla (2017) Antioxidant activity of essential oils from various Mexican oregano ecotypes and oil fractions obtained by distillation. *JSM Chemistry* 5(3): 1046. <https://doi.org/10.47739/2334-1831/1046>
- Simirgiotis MJ, Burton D, Parra F, López J, Muñoz P, Escobar H, Parra C (2020) Antioxidant and antibacterial capacities of *Origanum vulgare* L. essential oil from the arid Andean region of Chile. *Metabolites* 10: 414. <https://doi.org/10.3390/metabo10100414>
- Soto KM, Hernández-Iturriaga M, Cárdenas A, Mendoza S (2024) Biosynthesis of silver nanoparticles mediated by *Lippia graveolens* aqueous extract. *Journal of the Mexican Chemical Society* 68(3): 402-411. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v68i3.2070>
- Soto-Armenta LC, Sacramento-Rivero JC, Acereto-Escoffé PO, Peraza-González EE, Reyes-Sosa CF, Rocha-Uribe JA (2017) Extraction yield of essential oil from *Lippia graveolens* leaves by steam distillation at laboratory and pilot scales. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants* 20: 610-621. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2017.1331756>
- Sun M, Miao J, Zhang Y, Hao Y, Zhang J, Li H, Bai H, Shi L (2025) Antioxidant activity analysis of new interspecific hybrid germplasm thyme and oregano essential oils with different chemotypes. *BMC Plant Biology* 25(1): 33. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-06015-2>
- Systat Software Inc. (2011) SigmaPlot 12.0. Systat Software Inc., San Jose, CA, USA.
- Torrenegra-Alarcón M, Hernández-Santos R, León-Méndez G, Granados-Conde C, De La Espriella-Angarita S (2024) Especies vegetales con potencial antioxidante en la innovación de productos cárnicos

- procesados: una revisión. @limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria 22(1): 295-311. <https://doi.org/10.24054/limentech.v22i1.3185>
- Valdez-Baro O, Cruz-Lachica I, Tovar-Pedraza JM, Heredia JB, Bastidas-Bastidas PJ, Manjarrez-Quintero JP, García-Estrada RS (2025) Optimization of Mexican oregano essential oil (*Lippia graveolens*) Extraction with Fungicidal and Oomycetocidal Effects Against Plant Pathogens. Processes 13(2): 490. <https://doi.org/10.3390/pr13020490>
- Yusof Z, Ramasamy S, Mahmood NZ, Yaacob JS (2018) Vermicompost supplementation improves the stability of bioactive anthocyanin and phenolic compounds in *Clinacanthus nutans* Lindau. Molecules 23(6): 1345. <https://doi.org/10.3390/molecules23061345>