

Factores que influyen en el rendimiento de aceite esencial de *Pimenta dioica* L. durante hidrodestilación

Factors influencing the yield of *Pimenta dioica* L. essential oil during hydrodistillation

Angélica Alejandra Ochoa-Flores¹ , Mireya Martínez-Rodríguez² , Gilber Vela-Gutiérrez³ , Hugo Sergio García-Galindo⁴ , Rodrigo Alberto Hernández-Ochoa⁵ ,
Josafat Alberto Hernández-Becerra^{6*} 

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Agropecuarias, Carretera Villahermosa-Teapa Km 25, CP. 86298, Centro, Tabasco, México.

²Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez, Carretera Estatal Libre Villahermosa-Comalcalco Km. 27+000 s/n Ranchería Ribera Alta, CP. 86205, Jalpa de Méndez, Tabasco, México.

³Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Facultad de Ciencias de la Nutrición y Alimentos, Libramiento Norte Poniente 150, Col. Lajas Maciel, CP. 29000, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

⁴Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Veracruz, Unidad de Investigación y Desarrollo de Alimentos, Av. Miguel Ángel de Quevedo 2779, Col. Formando Hogar, CP. 91897 Veracruz, Veracruz, México.

⁵McGill University, Department of Chemistry, 801 Sherbrooke Street W., H3A 0B8, Montreal, Quebec, Canada.

⁶Universidad Tecnológica de Tabasco, División Académica de Procesos Industriales, Carretera Villahermosa-Teapa, Km 14.6 s/n, Fraccionamiento Parrilla II, CP. 86280, Centro, Tabasco, México.

*Autor de correspondencia: jahernandez.tc@uttat.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 30 de septiembre 2024

Aceptado: 29 de septiembre 2025

RESUMEN. Aceites esenciales (AE) derivados de diferentes plantas como *Pimenta dioica* L., son obtenidos mediante hidrodestilación, son altamente valorados a nivel internacional y requieren el estudio de los factores que determinan su rendimiento y calidad. El objetivo del presente estudio consistió en evaluar el efecto de la intensidad de calentamiento y la relación agua/sólidos (A/S) sobre la velocidad de extracción y rendimiento del AE obtenido por hidrodestilación de hojas frescas de *P. dioica* L. Recortes de hojas de aproximadamente 1 cm², junto con 500 ml de agua, fueron sometidos a proceso de hidrodestilación durante 6 horas. Un diseño factorial 3X2 con tres réplicas fue considerado para la definición de los tratamientos. Los factores estudiados fueron relación A/S en tres niveles (2, 6 y 10) y la intensidad de calentamiento en dos niveles (105 °C y 120 °C). Muestras del condensado fueron recolectadas, sometidas a extracción líquido-líquido con éter de petróleo, combinando las fases etéreas, eliminando los residuos de agua y evaporando el solvente. El AE obtenido para cada muestra fue estimado gravimétricamente. Los resultados indicaron que la relación agua/sólidos (A/S), la intensidad del calentamiento, así como su interacción, tienen un significativo efecto ($p < 0.05$) sobre la velocidad de extracción y el rendimiento final acumulado. Las condiciones de 120 °C y relación A/S de 2 y 6, fueron las que generaron mayor velocidad de extracción ($K = 69.68 \pm 11.58$ min y 55.48 ± 3.59 min respectivamente), así como mayor rendimiento (737.98 ± 61.5 mg 100 g⁻¹ y 719.99 ± 45.06 mg 100 g⁻¹).

Palabras clave: Pimienta Tabasco, *Pimenta dioica*, relación agua/sólidos, intensidad de calentamiento, aceite esencial.

ABSTRACT. Essential oils (EO) derived from different plants, such as *Pimenta dioica* L., are obtained by hydrodistillation, are highly valued internationally, and require the study of the factors that determine their performance and quality. The objective of this study was to evaluate the effect of heating intensity and water/solids (W/S) ratio on the extraction rate and yield of EO obtained by hydrodistillation of fresh leaves of *P. dioica* L. Fresh leaves were cut into squares of approximately 1 cm² and, together with 500 ml of water, subjected to a hydrodistillation process for 6 hours. A 3X2 factorial design with three replications was considered to define the treatments. The factors studied were A/S at three levels (2, 6, and 10) and heating intensity at two levels (105° and 120 °C). Condensate samples were collected and subjected to liquid-liquid extraction with petroleum ether, combining the ether phases, removing water residues, and evaporating the solvent. The AE obtained for each sample was estimated gravimetrically. The results indicated that the water/solids (W/S) ratio, the heating intensity, as well as their interaction, have a significant effect ($p < 0.05$) on the extraction rate and the final accumulated yield. The conditions of 120 °C and W/S ratios of 2 and 6 were those that generated the highest extraction rate ($K = 69.68 \pm 11.58$ min and 55.48 ± 3.59 min, respectively), as well as the highest yield (737.98 ± 61.5 mg 100 g⁻¹ and 719.99 ± 45.06 mg 100 g⁻¹).

Key words: Tabasco pepper, *Pimenta dioica*, water/solids ratio, heating intensity, essential oil.

Como citar: Ochoa-Flores AA, Martínez-Rodríguez M, Vela-Gutiérrez G, García-Galindo HS, Hernández-Ochoa RA, Hernández-Becerra JA (2025) Factores que influyen en el rendimiento de aceite esencial de *Pimenta dioica* L. durante hidrodestilación. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 12(3): e4348. DOI: 10.19136/era.a12n3.4348.

INTRODUCCIÓN

La región sureste de México posee condiciones agroclimatológicas para el cultivo y aprovechamiento de *Pimenta dioica* (L.), especie originaria de México y Centroamérica ampliamente apreciada en el comercio internacional, conocida comúnmente como pimienta gorda, pimienta de Jamaica, pimienta guayabita, pimienta dulce, pimienta inglesa, malagueta y pimienta Tabasco, entre otros (Martínez-Pérez *et al.* 2013). El árbol de *P. dioica* produce unos frutos redondos de entre 5 y 10 mm de diámetro, los cuales tienen un fuerte olor fragante por lo que generalmente son empleados como condimento en diversos platillos regionales (Machuca *et al.* 2020). Uno de los principales atractivos sensoriales de *P. dioica* radica en su aroma y sabor que evocan una mezcla de clavo, canela, pimienta negra y nuez moscada, motivo por la cual en el mercado internacional se le conoce como “Allspice” (Martínez-Pérez *et al.* 2013). Los árboles de *P. dioica* generalmente inician su floración entre marzo y abril, cosechando sus frutos entre agosto y septiembre. La cosecha se lleva cabo de forma manual cuando éstos presentan una coloración verde a verde amarillenta. Su manejo postcosecha consiste en despicado (eliminación de pedúnculos) y posterior secado. El secado de los frutos puede realizarse en patios de cemento (asoleaderos) durante 8 a 15 días o en deshidratadores mecánicos (60 °C a 80 °C) por 38 a 42 horas, tras lo cual se clasifican por tamaño y se envasan (Martínez *et al.* 2004). La producción por árbol de *P. dioica* puede variar de entre 30 a 50 kg de fruto verde, la cual, debido a la pérdida de peso durante el secado puede llegar a rendir de entre 10 a 15 kg de producto seco (Martínez-Pérez *et al.* 2013).

En México, la totalidad del cultivo de pimienta se refiere a *Pimenta dioica* (L), colocándolo como uno de los principales países productores a nivel mundial (TRIDGE, 2025, Machuca *et al.* 2020). En el año 2024, la producción de pimienta en nuestro país alcanzó las 9 144.65 t, siendo el estado de Veracruz el primer productor con 6 732.11 t, seguido de Puebla (1 253.10 t) y Tabasco (921.25 t) (SIAP 2025). En total, la producción nacional de esta especie alcanzó un valor comercial de 143.44 millones de pesos (SIAP 2025). A pesar de que México se posiciona como uno de los principales productores a nivel mundial de *P. dioica*, la mayoría de los agricultores lo consideran un producto secundario y se limitan a la recolección y acondicionamiento del fruto mediante secado, clasificación y envasado, sin que existan esfuerzos significativos para otorgarle un mayor valor agregado, lo cual representa una oportunidad de incrementar los beneficios económicos para las comunidades productoras (Martínez-Pérez *et al.* 2013).

En este contexto, uno de los productos derivados de especias aromáticas con gran valor agregado son los aceites esenciales (Sharmeen *et al.* 2021). En el año 2022, el valor de mercado a nivel mundial estimado para los aceites esenciales fue de 8.8 billones de dólares y se pronostica que para el 2027 este valor crecerá a 15.3 billones de dólares debido a su creciente empleo en las industrias de los alimentos, bebidas, cuidado personal, así como la de la emergente industria de la aromaterapia (Markets y Markets 2025).

El aceite esencial de *P. dioica* puede ser obtenido de las hojas o frutos del árbol, alcanzando rendimientos que varían de 0.3 a 1.25% en hojas frescas y de 3.3 a 4.5% en los frutos secos (Douglas *et al.* 2005). La posibilidad de obtención de aceite esencial derivado de las hojas del árbol de *P. dioica* permite vislumbrar una alternativa de aprovechamiento comercial de este cultivo, más allá de la cosecha y comercialización estacional del fruto. En general, la obtención de aceites esenciales a

partir de diferentes matrices vegetales puede llevarse a cabo por diferentes métodos, siendo la hidrodestilación uno de los más empleados debido al bajo costo de inversión de los equipos (Douglas *et al.* 2005). No obstante, una problemática relacionada con la hidrodestilación consiste en que, por efecto de los largos periodos de calentamiento, los aceites esenciales pueden experimentar hidrólisis, isomerización u oxidación generando compuestos más solubles en agua que hacen difícil su extracción e influyen negativamente en el rendimiento (Richa *et al.* 2020). En este sentido y hasta donde nos ha sido posible conocer, no se han documentado estudios que analicen los principales factores que influyen en el rendimiento del aceite esencial obtenido mediante hidrodestilación de hojas del árbol de *P. dioica*. Considerando lo anterior, el objetivo del presente estudio consistió en evaluar el efecto de la intensidad de calentamiento y la relación agua/sólidos (A/S) sobre la velocidad de extracción y rendimiento del aceite esencial obtenido durante la hidrodestilación de hojas frescas de árboles de *Pimenta dioica* L.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material biológico

Hojas de *Pimenta dioica* (L) fueron recolectadas de árboles ubicados en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Tabasco (17°53'1.9" LN, 92°55'32.2" LO) y trasladadas al laboratorio de Análisis Especiales para su preparación y acondicionamiento. El acondicionamiento de las hojas consistió en realizar cortes de aproximadamente 1 cm² los cuales fueron almacenados bajo refrigeración en bolsas de polietileno hasta su empleo. El periodo de tiempo transcurrido desde la recolección y acondicionamiento de las hojas hasta su uso en la hidrodestilación no fue mayor a 16 horas.

Análisis del contenido de humedad

Los recortes de las hojas de *P. dioica* fueron analizados por triplicado en su contenido de humedad según lo establecido en el método 934.06 del AOAC (AOAC 2000).

Proceso de hidrodestilación

Los recortes de hojas de *P. dioica* se pesaron según la relación Agua/Sólidos (A/S) establecida para cada tratamiento y posteriormente se sometieron a hidrodestilación en un sistema conformado por un matraz de fondo redondo de 2 L, adicionándole 500 mL de agua destilada, acoplado a un equipo Clevenger y un condensador Allihn. El cual fue calentado de forma controlada mediante un baño de glicerol sobre una placa eléctrica, estableciéndose las temperaturas definidas en el diseño experimental y manteniendo el proceso durante 6 horas a partir de la primera gota de condensado recolectada (Figura 1).

Muestras conformadas por el condensado acumulado en el equipo Clevenger fueron recolectadas cada 10 min durante los primeros 60 min, a continuación, cada 20 min hasta los 200 min y finalmente cada 30 min hasta el final del proceso (360 min). Cada una de las muestras fue sometida a tres extracciones líquido-líquido empleando 3 mL de éter de petróleo en cada extracción, colectando las fases etéreas, eliminando el agua en ellas mediante la adición de sulfato de sodio anhidro, separando la fase etérea del sulfato de sodio y evaporando el solvente mediante corriente

de aire a temperatura ambiente. El aceite esencial obtenido fue cuantificando gravimétricamente después de la evaporación del solvente, estimando así el rendimiento acumulado a lo largo de la hidrodestilación.

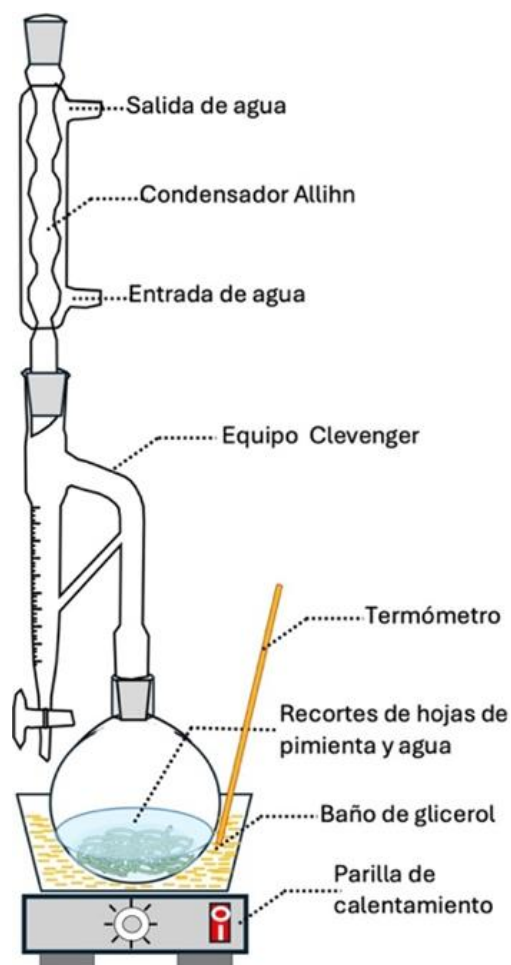


Figura 1. Esquema del sistema de hidrodestilación empleado durante el desarrollo del estudio.

Diseño experimental y análisis estadístico

El arreglo de los tratamientos fue en base a un diseño factorial 3x2 con tres repeticiones. Las hojas de *P. dioica* empleadas para cada réplica fueron recolectadas y acondicionadas en el día previo a la realización de la correspondiente corrida experimental, manteniéndolas bajo refrigeración hasta su uso tal y como se indicó previamente.

Los factores considerados fueron: La relación Agua/Sólidos (A/S) dentro del matraz y la intensidad de calentamiento durante la hidrodestilación, definida esta última como la temperatura a la cual se encontraba el baño de glicerol el cual suministraba calor al sistema. Los niveles considerados para la relación A/S fueron de 2, 6 y 10 (mL g⁻¹). En el caso de la intensidad de calentamiento fueron de 105 °C y 120 °C. Los anteriores niveles fueron seleccionados en base a reportes previos conjuntados en revisiones bibliográficas publicadas, en las cuales se reporta la obtención de aceites esenciales

empleando frutos y hojas de *P. dioica*, así como otras especies vegetales similares (Andrade-Ávila *et al.* 2022, Olascuaga-Castillo *et al.* 2024). Los valores de rendimiento acumulado, fueron calculados para cada uno de los tratamientos a lo largo del proceso de hidrodestilación y ajustados a la ecuación de Monod (Palacios-Ambrosio y Castillo-Martínez 2015).

$$R = \frac{(R_{max})(t)}{K + t}$$

Donde: R_{max} corresponde al rendimiento máximo obtenible, K la constante cinética de velocidad de extracción y t el tiempo.

Mediante regresión no lineal, con el software KaleidaGraph Ver 5.0.3 (Synergy Software 2022), se estimaron los parámetros cinéticos de R_{max} y K para cada tratamiento. Por otro lado, el rendimiento acumulado observado a las 6 horas de hidrodestilación, así como los parámetros cinéticos previamente estimados fueron considerados como las variables de respuesta sobre las cuales se analizó estadísticamente el efecto de los factores considerados en el diseño experimental y su interacción.

Los datos fueron analizados mediante Análisis de varianza (ANOVA), para detectar diferencias entre medias se realizó una comparación de medias de Tukey ($p < 0.05$) con el software Minitab (©2022 Minitab, LLC. All Rights Reserved).

RESULTADOS

La humedad presente en el material biológico a emplear durante el proceso de hidrodestilación es un parámetro de relevancia a considerar. En este sentido, las hojas frescas de *P. dioica* utilizadas en el presente estudio presentaron un contenido de humedad del $41.9 \pm 1.28\%$. Las hojas usadas en este estudio fueron recolectadas entre los meses de febrero y abril del año 2024.

El seguimiento de la liberación y recuperación del aceite esencial durante la hidrodestilación fue llevado a cabo en todos los tratamientos planteados (Figuras 2 y 3). En este sentido, se puede observar que los rendimientos acumulados de aceite esencial obtenido a lo largo del tiempo de proceso mostraron un muy buen ajuste al modelo de Monod. Los valores de R^2 estimados para cada uno de los diferentes tratamientos se encontraron en un rango de entre 0.9959 a 0.9994.

Durante la extracción de aceites esenciales por hidrodestilación diversos factores pueden influir grandemente sobre el rendimiento obtenido, siendo una de los más relevantes, la relación conformada por la cantidad de agua empleada en proporción de la matriz biológica inmersa en ella (A/S). En este sentido, en las Figuras 2 y 3 pueden observarse comportamientos diferenciados del rendimiento acumulado de aceite esencial estimado para cada uno de los diferentes tiempos de hidrodestilación. Así, cuando el proceso se llevó a cabo a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, menores rendimientos fueron observados en el caso de la relación A/S de 2, incrementando los rendimientos para el caso de los tratamientos cuya relación A/S fue de 6 y de 10 (Figura 2a). Sin embargo, para los tratamientos realizados a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, los mayores rendimientos observados a lo largo de todo el proceso se presentaron en aquellos cuya relación A/S fue de 6 y de 2, siendo siempre menores los rendimientos acumulados en el caso del tratamiento realizado con una relación A/S de 10 (Figura 2b).

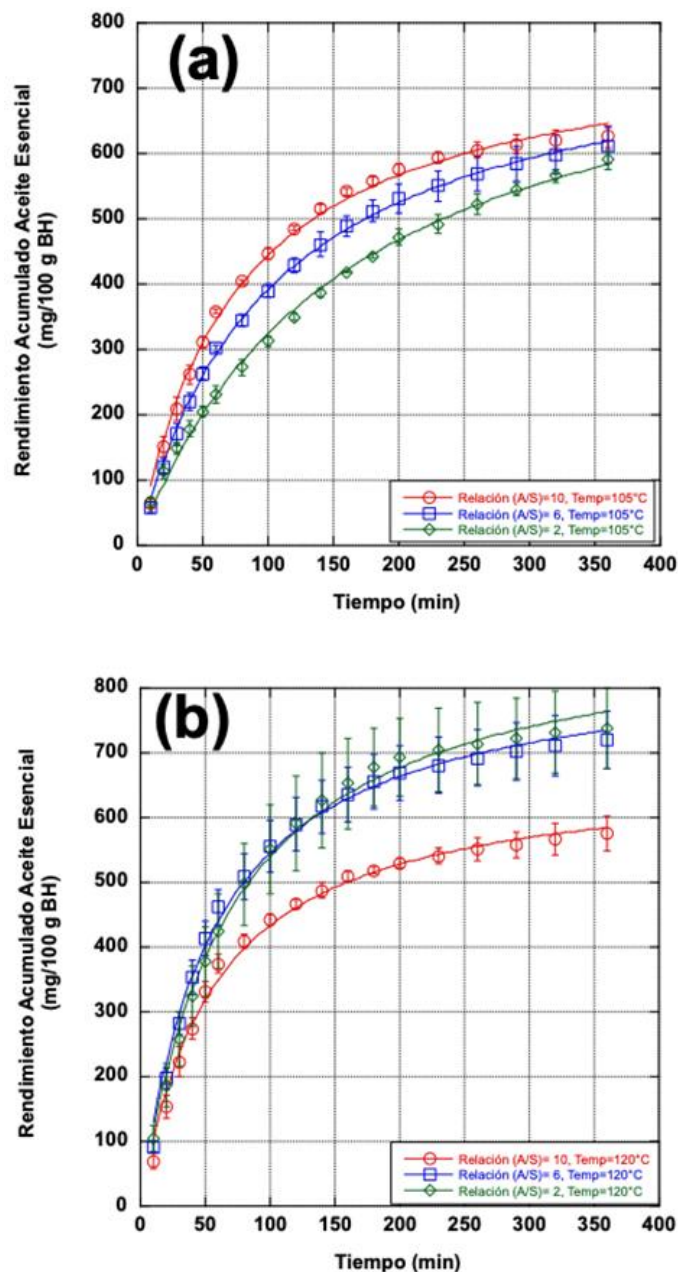


Figura 2. Rendimiento acumulado (mg/100 g BH) observado a lo largo del proceso de hidrodestilación llevados a cabo bajo diferentes relaciones A/S (10, 6 y 2) y una temperatura de 105 °C (a) y 120 °C (b). Cada valor mostrado corresponde al valor medio±desviación estándar de tres replicas. Las líneas continuas corresponden al mejor ajuste de los datos realizado con el modelo de Monod.

Por otro lado, al contrastar las tendencias del rendimiento acumulado observadas a diferentes intensidades de calentamiento (105 °C y 120 °C), pero considerando la misma relación A/S, puede apreciarse un mayor rendimiento acumulado, desde el inicio del proceso, para el caso de los tratamientos en donde la relación A/S fue de 2 y 6 (Figura 3a y 3b). No obstante, en el caso los

tratamientos cuya relación A/S fue de 10, el rendimiento acumulado observado durante los primeros 120 min fue muy similar. Sin embargo, después de 120 min el rendimiento acumulado fue mayor en el caso de los tratamientos realizados a la temperatura de 105 °C (Figura 3c).

Un análisis de varianza (ANOVA) considerando como variable de respuesta al rendimiento acumulado (obtenido después de 6 horas de proceso) indicó un efecto significativo ($p < 0.05$) de la relación A/S y de la intensidad de calentamiento, así como de la interacción conformada por ambos factores. En este sentido, puede observarse que cuando el calentamiento del sistema se lleva a cabo a 120 °C el rendimiento acumulado es significativamente mayor que cuando se lleva a cabo a 105 °C. El anterior comportamiento se presenta solo cuando la relación A/S es de 2 o 6. Sin embargo, cuando relación A/S incrementa a 10, el rendimiento acumulado decrece significativamente a niveles muy similares a los observados en los tratamientos realizados a 105 °C (Figura 4a).

El ajuste al modelo de Monod de los diferentes rendimientos acumulados derivados de los distintos tratamientos permite estimar algunos parámetros cinéticos relevantes. Uno de ellos es la constante de velocidad de extracción (K), valores bajos de K indicarían una mayor cantidad de aceite esencial liberado por unidad de tiempo. Al realizar un ANOVA considerando los valores de K estimados para cada uno de los diferentes tratamientos se encontró efecto significativo ($p < 0.05$) de la relación A/S y de la intensidad de calentamiento, así como de la interacción conformada por ambos factores. A este respecto, en la Figura 4c puede observarse que cuando el calentamiento del sistema se lleva a cabo a 120 °C los valores de K son significativamente menores que cuando se lleva a cabo a 105 °C. Este comportamiento se observa cuando la relación A/S es de 2 o 6, no siendo así para la relación A/S de 10. En este mismo sentido es importante señalar que a 120 °C, no hay diferencia significativa en los valores de K obtenidos en los tratamientos realizados a las diferentes relaciones A/S. Por otro lado, cuando los tratamientos se realizan a 105 °C, los valores de K incrementan al disminuir la relación A/S. Esto significa, que la cantidad de aceite esencial liberado por unidad de tiempo se reduce significativamente al disminuir la relación A/S.

En relación con los valores de Rmax estimados para los diferentes tratamientos, los resultados del ANOVA realizado mostraron un comportamiento muy similar al descrito para el rendimiento acumulado obtenido después de 6 horas de proceso (Figura 4b y 4a).

DISCUSIÓN

El contenido de humedad del material biológico destinado a la obtención de aceites esenciales mediante hidrodestilación es un parámetro importante que considerar debido a su influencia en la estimación del rendimiento. Estudios realizados en hojas de *P. dioica*, como el de M *et al.* (2024), reportan un contenido de humedad de $52.0 \pm 4.5\%$, el cual es superior al encontrado en las hojas empleadas en la presente investigación ($41.9 \pm 1.28\%$). Lo anterior, puede deberse a los diferentes periodos del año en las que se realizó la recolección de las hojas en ambos estudios, así como a la edad y las condiciones agronómicas específicas de los árboles involucrados.

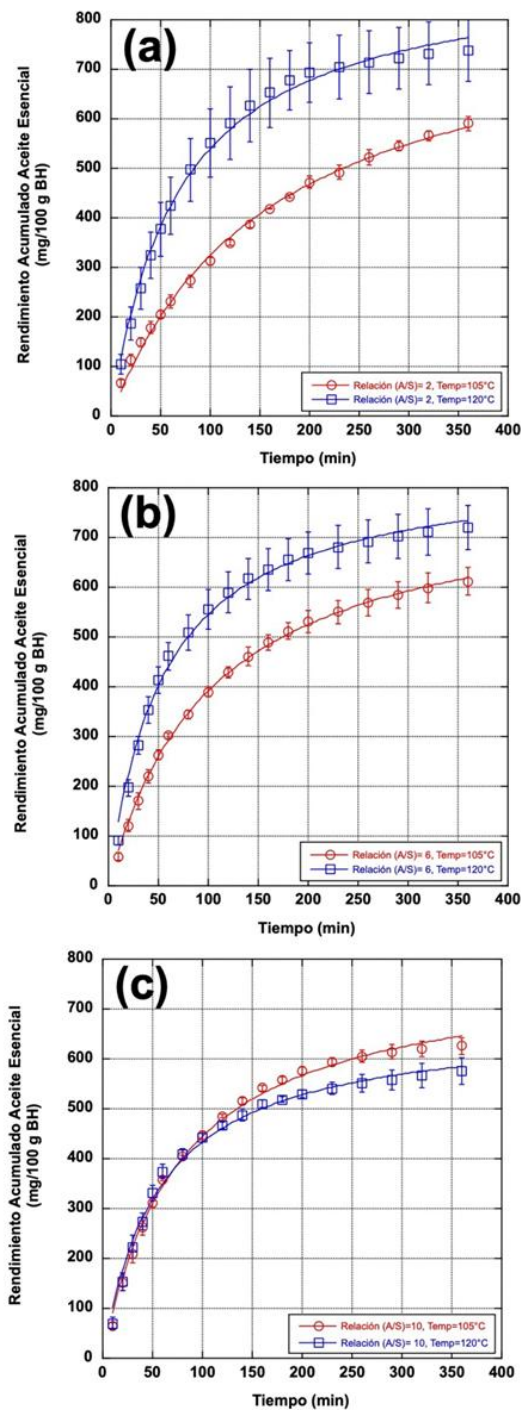


Figura 3. Rendimiento acumulado (mg/100 g BH) observado a lo largo del proceso de hidrodestilación llevados a cabo a diferentes temperaturas (105 °C y 120 °C) con relaciones A/S de 2 (a), 6 (b) y 10 (c). Cada valor mostrado corresponde al valor medio±desviación estándar de tres replicas. Las líneas continuas corresponden al mejor ajuste de los datos realizado con el modelo de Monod.

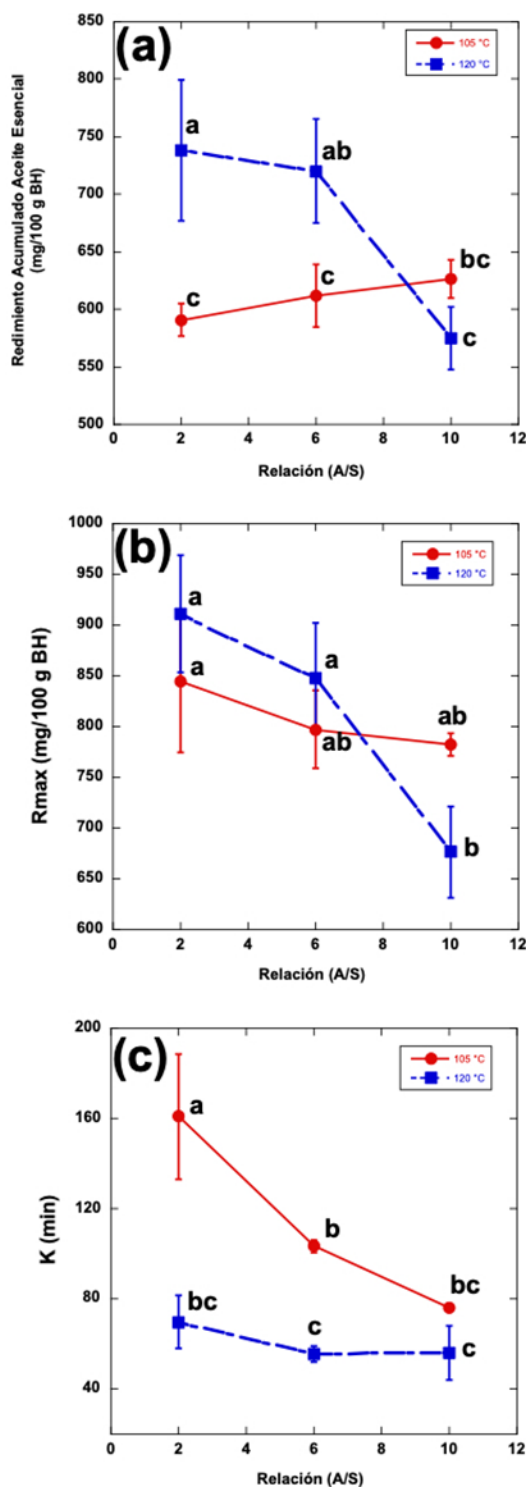


Figura 4. Efecto de la interacción formada por la relación A/S y la intensidad de calentamiento sobre: (a) el rendimiento acumulado de aceite esencial a las 6 horas, (b) valores Rmax y (c) valores de K. Cada valor mostrado corresponde al valor medio $\pm$ desviación estándar de tres replicas. Valores que no comparten letra dentro de cada gráfico son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

La hidrodestilación como proceso a través del cual el aceite esencial contenido en una matriz vegetal es liberado y posteriormente recuperado ha sido estudiado desde diferentes perspectivas. En este sentido, algunos estudios se han enfocado en proponer modelos cinéticos que estiman el rendimiento acumulado en función del tiempo de hidrodestilación con el fin de analizar el efecto de diversos factores sobre el rendimiento y otros parámetros (Dao *et al.* 2020). Este es el caso del modelo de Monod, el cual permite determinar algunos parámetros cinéticos relevantes, tales como la constante cinética de velocidad de extracción (K) y el rendimiento máximo obtenible (R_{max}). En la presente investigación, los rendimientos acumulados obtenidos en los diferentes tratamientos indicaron un buen ajuste al modelo, alcanzando valores de R² similares a los reportados en estudios en donde el modelo de Monod también fue utilizado (Palacios-Ambrosio y Castillo-Martínez 2015).

Las plantas caracterizadas por producir aceites esenciales durante su desarrollo generalmente los almacenan en receptáculos especiales denominados tricomas glandulares (Martínez-Nataren *et al.* 2023). Estos tricomas durante el proceso de hidrodestilación sufren daño estructural favoreciendo la difusión y liberación de los aceites esenciales e influyendo directamente en el rendimiento obtenido. En este sentido, la cantidad de aceite esencial que es liberado y recuperado durante el proceso de hidrodestilación puede ser afectado por diferentes factores tales como, la relación A/S, la intensidad y manera en que el calor es suministrado, el tiempo de proceso, el tamaño de partícula, así como otros tratamientos previos a los que puede ser sometido el material vegetal (Olascuaga-Castillo *et al.* 2024, Lainez-Ceron *et al.* 2021). De los factores anteriormente indicados, el presente estudio solo se limitó evaluar la relación A/S y la intensidad de calentamiento ya que se consideró que éstos son los de mayor relevancia. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que otros factores y sus interacciones puedan generar mejores resultados.

La relación A/S es un factor relevante dentro del proceso de hidrodestilación ya que el agua es el medio de convección a través del cual la energía calórica alcanza los tricomas glandulares. Sin embargo, el empleo de una gran cantidad de agua en relación con el material vegetal implica un mayor gasto energético por gramo de aceite esencial finalmente extraído, lo que impacta en la rentabilidad del proceso. Por otro lado, la reducción en la proporción de agua en relación con el material vegetal implica un menor volumen de agua circundante alrededor del material vegetal favoreciendo su agregación o compactación, limitando la liberación del aceite esencial y favoreciendo algunas reacciones de degradación (Phuoc-Sang *et al.* 2022, Olascuaga-Castillo *et al.* 2024, Lainez-Ceron *et al.* 2021). Por lo anterior, es muy importante determinar la relación A/S adecuada para que el proceso de extracción sea eficiente y rentable.

En este contexto, durante el presente estudio se observaron diferencias en el rendimiento acumulado a lo largo de las cinéticas de hidrodestilación de los tratamientos realizados con relaciones A/S de 2, 6 y 10 (Figuras 2a y b). Lo anterior puede explicarse si se considera que en relaciones A/S de 2, la cantidad de sólidos vegetales por volumen de agua es mayor en comparación con relaciones de 6 y 10. Lo anterior implica que cuando el sistema es sometido a una intensidad de calor baja (105 °C, Figura 2a), la cantidad de energía calórica por unidad de masa de la materia vegetal es menor en la A/S de 2 en comparación con los tratamientos realizados a una A/S de 6 o 10. Esto conllevaría a menor daño estructural, así como menor difusión y liberación de aceite esencial, principalmente durante las primeras 4 horas (240 min) de hidrodestilación (Figura 2a). Lo anterior concuerda con lo reportado por Phuoc-Sang *et al.* (2022) quienes estudiando la obtención

por hidrodestilación de aceite esencial de frutos de *Triphasia trifolia* indican que la cantidad de agua en relación con el material vegetal afecta significativamente el tiempo de extracción y ligeramente el rendimiento finalmente obtenido.

La mayor intensidad de energía calorífica suministrada al sistema genera un mayor y más rápido daño estructural en los tricomas, así como, incrementos en la velocidad de difusión y liberación del aceite esencial (Olascuaga-Castillo *et al.* 2024, Lainez-Ceron *et al.* 2021). Esto explica el aumento en los rendimientos acumulados observados a lo largo de todas las cinéticas de hidrodestilación cuando los tratamientos, realizados a una relación A/S de 2 y 6, pasaron de 105 °C a 120 °C (Figuras 2a y b; 3a y b; 4a). Si bien, el mayor daño estructural en los tricomas, así como una mayor tasa de transferencia de masa entre el material y el medio, explican el incremento en los rendimientos acumulados, otros fenómenos, tales como la cavitación pueden también estar involucrados. En este sentido, Phuoc-Sang *et al.* (2022) reportaron que una baja temperatura en el baño de aceite empleado para suministrar energía calorífica a su sistema de hidrodestilación generó una cavitación ligera, la cual incrementó al aumentar la temperatura en el baño de aceite. Así, una mayor cavitación fomentó un aumento en la difusión del aceite esencial hacia el agua circundante, favoreciendo un mayor rendimiento del aceite esencial. En base a todo lo antes expuesto, es comprensible que una mayor intensidad de calor suministrado al sistema mejora el rendimiento acumulado a lo largo del proceso. No obstante, si éste se incrementa mucho más o se mantiene por un tiempo muy prolongado, es muy posible que compuestos sensibles presentes en el aceite esencial experimenten reacciones de degradación, tales como hidrólisis, isomerización u oxidación (Richa *et al.* 2020, Olascuaga-Castillo *et al.* 2024, Lainez-Ceron *et al.* 2021). Esto provoca que dichos componentes se solubilizan en el entorno acuoso, no puedan ser recuperados y en consecuencia los rendimientos alcanzados pueden reducirse significativamente. Esto explicaría el menor rendimiento acumulado observado a lo largo de las cinéticas de hidrodestilación del tratamiento llevado a cabo a 120 °C con una relación A/S de 10 (Figuras 2b, 3c y 4a).

Es de señalar que la posible degradación del aceite liberado, y por consecuencia el menor rendimiento, solo se presentó en el tratamiento conformado por una relación A/S de 10, siendo contrario el comportamiento cuando se evaluaron tratamientos con una relación A/S de 6 y 2. Una posible explicación a lo anterior involucra a dos posibles procesos, ambos dependientes de la energía suministrada al sistema y que se estarían llevando a cabo de manera simultánea durante la hidrodestilación, siendo dominante uno sobre el otro en función de la relación A/S. El primero de estos procesos contempla en una primera fase la ruptura de los tricomas glandulares con la consecuente liberación del aceite esencial al entorno acuoso, que debido a la mayor proporción de materia vegetal con respecto al agua circundante (tratamientos con relación A/S de 2 o 6) provoca, en una segunda fase, la pronta saturación del entorno y una rápida evaporación de los principales componentes del aceite esencial y así lograr ser condensados y recuperados fuera del sistema. De esta forma mayores rendimientos son observados a relaciones A/S bajas (2 o 6) (Figura 3a y b). El segundo proceso consiste en las reacciones de degradación que los principales componentes del aceite esencial experimentan cuando son liberados de los tricomas glandulares, enfrentándose a un entorno acuoso en donde, debido a la menor proporción de materia vegetal con respecto al agua circundante (tratamientos con relaciones de A/S de 10) no se logra una pronta saturación del entorno, limitando así su evaporación y posterior recuperación. De esta forma se ve favorecido el

proceso de degradación sobre la saturación y evaporación de los componentes del aceite esencial y por consecuencia el menor rendimiento observado en la relación A/S de 10 (Figura 3c).

Un parámetro relevante del análisis cinético del proceso de hidrodestilación corresponde a la constante de velocidad de extracción (K). Los resultados en la Figura 4c muestran que este parámetro fue influenciado por la relación A/S, así como por la temperatura del baño de glicerol que suministró la energía calorífica al sistema. En este sentido, el comportamiento de este parámetro en los tratamientos de 105 °C, coinciden con lo reportado por Lainez-Ceron *et al.* (2021), quienes al hidrodestilar hoja de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*), encontraron que los tratamientos llevados a cabo bajo una relación de 1:5 (g mL⁻¹) presentaban un valor de la constante de velocidad de extracción menor (5.53 min⁻¹) que los tratamientos a una relación de 1:3 (g mL⁻¹) (16.66 min⁻¹), generando un mayor rendimiento acumulado final de aceite esencial en los tratamientos con relación 1:5 (g mL⁻¹) (1.13 ± 0.04%). Por otro lado, el comportamiento de los valores del parámetro K observado en nuestro estudio y llevados a cabo con relaciones A/S de 2 y 6, fueron también influenciados por la temperatura del baño de glicerol que suministró la energía calorífica al sistema. El anterior comportamiento también coincide con lo observado por Palacios-Ambrosio y Castillo-Martínez (2015), quienes al evaluar el efecto del flujo de vapor sobre el parámetro K y el rendimiento de aceite esencial de hierbaluisa (*Aloysia citrodora*) encontraron que tratamientos llevados a cabo a un menor flujo de vapor (4 kg h⁻¹) generaron un valor de K de 45.74 min, el cual es mayor que el observado en tratamientos relajados a 6 kg h⁻¹ (35.14 min). El anterior comportamiento generó un mayor rendimiento acumulado de aceite esencial en el caso de los tratamientos con mayor flujo de vapor (6 kg h⁻¹) (0.0797 g g⁻¹ de materia prima). En contraste, los tratamientos llevados a cabo a un menor flujo de vapor (4 kg h⁻¹) el rendimiento acumulado de aceite esencial fue de 0.0744 g g⁻¹ de materia prima.

El rendimiento final acumulado de aceite esencial de *P. dioica* obtenido por hidrodestilación bajo las diferentes condiciones de extracción evaluadas en este estudio vario de entre 580 a 610 mg de aceite esencial por cada 100 g de hojas frescas. Esta variabilidad está directamente relacionada con las diferentes condiciones de procesamiento empleadas. No obstante, el rango de rendimientos coincide con los reportados por diferentes investigadores, en donde se reporta que el rendimiento de aceite esencial de *P. dioica* se encuentra entre 300 mg y 1250 mg por cada 100 g de hojas frescas (Douglas *et al.* 2005). Lo antes planteado indica que el rendimiento acumulado de aceite esencial de *P. dioica* puede variar no solo en función de las condiciones agro-climatológicas imperantes alrededor de los árboles, sino que también depende marcadamente de las diferentes condiciones de procesamiento aplicadas para su obtención. Estas condiciones incluyen la relación A/S, la intensidad del suministro de energía calorífica al sistema y el tiempo de hidrodestilación, entre otras. Lo anterior orienta hacia futuros estudios en donde se aborde optimizar el proceso de manera que el gasto energético de su operación sea menor y el costo de producción más económico.

CONCLUSIONES

En la hidrodestilación de hojas frescas de *Pimenta dioica* (L) para la obtención de aceite esencial, la relación agua/sólidos (A/S) y la intensidad del calentamiento tienen significativo efecto sobre la

velocidad de extracción y el rendimiento final acumulado, siendo las condiciones de 120 °C y relación A/S de 2 y 6, las que mayor velocidad de extracción y rendimiento generan a lo largo del proceso.

AGRADECIMIENTOS

Al consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Tabasco (CCYTET), por el apoyo brindado a través del proyecto PRODECTI- 2023-01/61.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Andrade-Ávila Y, Cruz-Olivares J, Pérez-Alonso C (2022) Antioxidants effect and medicinal propoerties of allspice essential oil. In: Santana-De-Oliveira M, De-Aguiar-Andrade E, Blumenberg M (eds) Essential oils - Advances in extractions and biological applications. IntechOpen. London. pp. 1-15. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3280-8_1
- AOAC (2000) Official Method 934.06 Moisture in dried fruits. Fruits and fruits products. In: Horwitz W (ed) Official Methods of Analysis of AOAC International Volume II, Chapter 37, 17 edition. AOAC International. Maryland, USA. pp 4-6
- Dao T, Do H, Le QK, Phap N, Bach L, Muoi N, Cang M (2020) Kinetic studies on extraction of essential oil from lemongrass leaves (*Cymbopogon citratus*) by steam distillation industrial scale. Asian Journal of Chemistry 32(6): 1399-1403.
- Douglas M, Heyes J, Smallfield B (2005) Herbs, spices and essential oils. Post-harvest operatios in developing countries. Technical report, Institute for Crop and Food Research Inc. 61p.
- Lainez-Ceron E, Jimenez-Munguia M, Lopez-Malo A (2021) Effect of process variables on heating profiles and extraction mechanisms during hydrodistillation of *Eucalyptus essential oil*. Heliyon 7: e08234. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08234>
- M SP, Rastogi NK, Murthy PS (2024) Implications of dehydration processing on the bio-actives, chemometrics and fingerprinting of allspice (*Pimenta dioica* L.) leaves. Food Biophysics 19: 1157-1176. <https://doi.org/10.1007/s11483-024-09885-z>
- Machuca P, Pulido-Salas M, Trabanino F (2020) Past and present of allspice (*Pimenta dioica*) in Mexico and Guatemala. Revue d'ethno Écologie 18: 2020. <https://doi.org/10.4000/ethnoecologie.6261>
- Markets and Markets (2025) Essential oils market analysis and report summary. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/essential-oil-market-119674487.html> Fecha de consulta: 16 septiembre de 2025.
- Martínez-Pérez D, Hernández-García M, Martínez-González E (2013) La pimienta gorda en Mexico (*Pimenta dioica* L. Merrill): avances y retos en la gestion de la innovacion. Coleccion Trópico Húmedo. Universidad Autónoma de Chapingo. Estado de México, México. 72p.
- Martínez M, Evangelista V, Mendoza M, Basurto F, Mapes C (2004) Estudio de la pimienta gorda, *Pimenta dioica* (L.) Merrill, un producto forestal no maderable de la sierra norte de Puebla, México. In:

- Alexander M, Shanley P (eds), Productos forestales, medios de subsistencia y conservación. Estudios de caso sobre sistemas de manejo de productos forestales no maderables. Volume 3, America Latina. CIFOR. pp. 23-41.
- Martínez-Natareén D, Castillo-Burguete M, Chávez-Pesqueira M, Calvo-Irabién L (2023) ¿Donde se producen los aceites esenciales en las plantas aromaticas?. Desde el Herbario CICY 15: 57-62.
- Olascuaga-Castillo K, Castillo-Medina O, Villacorta-Zavaleta M, Diaz-Ortega J, Blanco-Olano C, Altamirano-Sarmiento D, Valdiviezo-Campos J (2024) Extraction of essential oils by hydrodistillation of four aromatic species: Conditioning, extraction conditions, yield and chemical composition. Scientia Agropecuaria 15(3): 385-408.
- Palacios-Ambrocio AL, Castillo-Martínez WE (2015) Modelamiento de extracción del aceite esencial de *Aloysia citriodora* y *Schinus molle*. Revista Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación 2(2): 14-24.
- Phuoc-Sang H, Xuan-Cuong L, Minh-Thuan H, Thien H, Tan P, Tien- Xuan L (2022) A study on factors influencing the hydrodistillation of *Triphasia trifolia* essential oil. Indonesian Journal of Chemistry 22(4): 887-895.
- Richa R, Kumar R, Shukla R, Khan K (2020) Ultrasound assisted essential oil extraction technology: New boon in food industry. SKUAST Journal of Research 22(2): 78-85.
- Sharmeen JB, Mahomoodally FM, Zengin G, Maggi F (2021) Essential Oils as Natural Sources of Fragrance Compounds for Cosmetics and Cosmeceuticals. Molecules 26: 666. <https://doi.org/10.3390/molecules26030666>
- SIAP (2025) Anuario estadístico de la producción agrícola. Cultivo Pimienta. Cíclicos-Perennes. Modalidad Riego+Temporal. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta: 16 septiembre de 2025.
- TRIDGE (2025) Allspice. Overview of Global Allspice Market. Tridge. <https://www.tridge.com/intelligences/allspice>. Fecha de consulta: 16 septiembre de 2025.