

## Actividad insecticida del aceite esencial de orégano, *Origanum vulgare* (Lamiaceae), contra larvas del gusano de la harina (*Tenebrio molitor*, Coleoptera: Tenebrionidae).

Esteban Garita-Brenes<sup>1</sup> , & José Andrés Rojas-Chacón<sup>2</sup> 

1. Universidad Estatal a Distancia, Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Ingeniería Agronómica, 2050 Sabanilla, San José, Costa Rica; eggarita@uned.cr
2. Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía, 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica; jose.rojaschacon@ucr.ac.cr

Recibido 28-V-2026 • Corregido 21-VII-2026 • Aceptado 04-IX-2026

DOI: <https://doi.org/10.22458/urj.v18i1.6624>

**ABSTRACT.** “Insecticidal activity of the essential oil of oregano, *Origanum vulgare* (Lamiaceae) against the yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*, Coleoptera: Tenebrionidae).” **Introduction:** *Tenebrio molitor* is a major stored-product pest that causes economic losses and contamination of grains and derived products. Given the limitations of synthetic insecticides, including resistance, residual toxicity, and environmental pollution, essential oils from aromatic plants are potential alternatives for pest management. **Objective:** To evaluate the effects of *Origanum vulgare* essential oil on the mortality and survival of *T. molitor* larvae under laboratory conditions. **Methods:** We obtained the essential oil from dried *O. vulgare* leaves by hydrodistillation using a Clevenger apparatus. We evaluated four treatments: T1, miscible liquid of pure oregano extract; T2, soluble concentrate of the extract residue; T3, a commercial insecticide based on Prallethrin and d-Phenothrin; and T4, control. We sprayed the treatments onto larvae kept in plastic trays for six days. We recorded mortality and survival daily and analyzed them using analysis of variance (ANOVA) and generalized linear models (GLM) with a binomial distribution. **Results:** Mortality differed significantly among treatments ( $F = 3.631$ ;  $p = 0.0451$ ). T3 produced the highest mortality, close to 40%, and the lowest survival, differing significantly from the other treatments. T1, T2, and the control had mortality below 10%, with no significant differences among them. **Conclusion:** The *O. vulgare* formulations failed to produce the desired mortality under the evaluated conditions. We recommend testing higher concentrations to determine whether increased doses can achieve effective insecticidal activity against *T. molitor*.

**Keywords:** botanical pesticides, stored-grain protection, biopesticides, plant-based formulations, pest control, natural products, sustainable agriculture.

**RESUMEN. Introducción:** *Tenebrio molitor* es una de las principales plagas de productos almacenados, causa pérdidas económicas y contaminación de granos y productos derivados. Ante las limitaciones de los insecticidas sintéticos, como resistencia, toxicidad residual y contaminación ambiental, los aceites esenciales de plantas aromáticas son alternativas potenciales para el manejo de esta plaga. **Objetivo:** evaluar los efectos del aceite esencial de *Origanum vulgare* sobre la mortalidad y supervivencia de larvas de *T. molitor* en condiciones de laboratorio. **Métodos:** obtuvimos el aceite esencial de hojas secas de *O. vulgare* mediante hidrodestilación con un aparato Clevenger. Evaluamos cuatro tratamientos: T1, líquido miscible de extracto puro de orégano; T2, concentrado soluble del residuo del extracto; T3, insecticida comercial a base de Pralletrina y d-fenotrina; y T4, control. Aplicamos los tratamientos mediante aspersión sobre larvas mantenidas en bandejas plásticas durante seis días. Registramos diariamente la mortalidad y supervivencia y las analizamos mediante análisis de varianza (ANOVA) y modelos lineales generalizados (GLM) con distribución binomial. **Resultados:** la mortalidad difirió significativamente entre tratamientos ( $F = 3,631$ ;  $p = 0,0451$ ). T3

produjo la mayor mortalidad, cercana al 40%, y la menor supervivencia, con diferencias significativas respecto a los demás tratamientos. T1, T2 y el control presentaron mortalidades inferiores al 10%, sin diferencias significativas entre ellos. **Conclusión:** las formulaciones de *O. vulgare* no produjeron una mortalidad deseable en las condiciones evaluadas. Recomendamos probar concentraciones mayores para determinar si dosis más altas pueden alcanzar una actividad insecticida efectiva contra *T. molitor*.

**Palabras clave:** plaguicidas botánicos, protección de granos almacenados, bioplaguicidas, formulaciones de origen vegetal, control de plagas, productos naturales, agricultura sostenible.

---

El escarabajo de la harina *Tenebrio molitor* (L.) (Coleoptera: Tenebrionidae) es una de las principales plagas de productos agrícolas en todo el mundo (Flinn et al., 2003). Su infestación en granos almacenados ocasiona contaminación directa mediante fragmentos de cuerpo y heces, así como indirecta, a través de microorganismos saprófitos asociados (Guo et al., 2018; Neethirajan et al., 2007). Estas alteraciones afectan negativamente la calidad de los alimentos, impidiendo que sean aptos para el consumo humano (Barnes & Siva-Jothy, 2000).

Entre los métodos para controlar *T. molitor* se encuentran el tratamiento de temperatura (Boyer et al., 2012), atmósfera controlada (Mohammed et al., 2020), tratamientos físicos (Vincent et al., 2003) y uso de insecticidas químicos (Morrison et al., 2021). Sin embargo, las consecuencias negativas como el desarrollo de resistencia a los insecticidas (Nayak et al., 2020), contaminación ambiental (Goulson, 2013) y toxicidad residual (Houbraken et al., 2016) han limitado la aplicación del control químico. Por ello, la búsqueda de nuevas estrategias de manejo de plagas resulta fundamental para proteger los productos almacenados, considerando los efectos adversos de los insecticidas sintéticos (Bumbulytė et al., 2023; Campolo et al., 2018).

Los productos químicos naturales derivados de las plantas, conocidos como metabolitos secundarios, han demostrado ser eficaces como posibles alternativas a los insecticidas sintéticos (Ebadollahi et al., 2020). En particular, los aceites esenciales (AE), compuestos vegetales caracterizados por su alta volatilidad y baja densidad han cobrado un papel destacado en la investigación de pesticidas naturales (Kavallieratos et al., 2025). Diversos estudios han evidenciado que los AE poseen actividad insecticida frente a diferentes especies de insectos y ácaros, ofreciendo así un enfoque prometedor para el control de plagas (Plata-Rueda et al., 2017, 2021; Wanna et al., 2025). Además, estos compuestos presentan propiedades ecotoxicológicas favorables, tales como baja toxicidad para los seres humanos, rápida degradación y menor impacto ambiental, lo que los convierte en una alternativa sostenible y segura frente a los insecticidas químicos convencionales (Brito et al., 2021; Chaudhari et al., 2021).

La planta de orégano (*Origanum vulgare*), perteneciente a la familia Lamiaceae, es una especie aromática ampliamente utilizada en la industria alimentaria, farmacéutica y agrícola debido a la presencia de metabolitos secundarios con propiedades biológicas relevantes, entre ellas actividad antimicrobiana, antioxidante e insecticida (Mrabet et al., 2025; Plata-Rueda et al., 2021).

Los principales compuestos bioactivos presentes en su aceite esencial, como el carvacrol y el timol, han demostrado efectos tóxicos y repelentes sobre diversos insectos plaga, afectando procesos fisiológicos y neurológicos esenciales para su supervivencia (Plata-Rueda et al., 2021). Debido a estas características, el aceite esencial de *O. vulgare* ha despertado un creciente interés como alternativa natural al uso de insecticidas sintéticos (Toledo & Abreu, 2025; Wang et al., 2015). Nuestro objetivo fue evaluar los principales compuestos del aceite esencial de *O. vulgare* y su efecto sobre la mortalidad y supervivencia de *T. molitor*.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Establecimientos del pie de cría

Obtuvimos los individuos de *Tenebrio* en un establecimiento dedicado a la venta de insumos para la instalación y mantenimiento de acuarios. Se mantuvieron los adultos de *T. molitor* en bandejas de plástico de 14cm de largo × 13cm de ancho × 7,5cm de alto, bajo un fotoperiodo de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad. Los adultos permanecieron en estas condiciones durante un periodo aproximado de 8 semanas, permitiendo el proceso de adaptación, apareamiento y oviposición. Posteriormente, se permitió el desarrollo de la progenie hasta alcanzar el estadio larval requerido para los ensayos experimentales. Las larvas obtenidas fueron seleccionadas y utilizadas para evaluar el efecto del extracto bajo las condiciones establecidas. Alimentamos los adultos *ad libitum* con hojuelas de avena (12,5% de proteína, 7,5% de grasas totales, 67,5% de carbohidratos y 12,5% de minerales/azúcares), rodajas de zanahoria (*Daucus carota*).

### Extracción del aceite esencial de *Origanum vulgare*

Obtuvimos el aceite esencial mediante hidrodestilación utilizando un equipo tipo Clevenger en el Laboratorio de Química de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Estatal a Distancia. Para cada extracción empleamos 157g de hojas secas de *Origanum vulgare*, previamente troceadas, y 500mL de agua destilada como solvente de extracción. La mezcla se sometió a calentamiento hasta alcanzar el punto de ebullición y se mantuvo en esas condiciones durante aproximadamente 3h, permitiendo el arrastre de los compuestos volátiles por efecto del vapor de agua.

Posteriormente, recolectamos el condensado en el brazo graduado del aparato tipo Clevenger, donde la fase oleosa se separó de la fase acuosa por diferencia de densidades. Recuperamos el aceite esencial mediante una micropipeta, lo deshidratamos con sulfato de sodio anhidro y lo almacenamos en viales de vidrio ámbar bajo refrigeración a 4°C hasta su utilización. Asimismo, conservamos la fase acuosa residual (hidrolato), obtenida durante el mismo proceso de hidrodestilación, para su evaluación biológica como un tratamiento independiente.

De esta forma, el tratamiento T1 correspondió al aceite esencial obtenido por hidrodestilación, mientras que el tratamiento T2 correspondió al hidrolato generado durante el proceso de extracción. Antes de realizar la evaluación biológica, analizamos una muestra del aceite esencial mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), confirmando la presencia de carvacrol como uno de los principales compuestos identificados.

### Prueba de mortalidad

Utilizamos un diseño completamente al azar (DCA) conformado por cuatro tratamientos y cuatro repeticiones, para un total de 16 unidades experimentales. Cada unidad experimental consistió en una bandeja plástica con orificios en la tapa para favorecer la ventilación. En cada bandeja colocamos 5g de avena y dos rodajas de zanahoria, las cuales reemplazamos cada dos días durante el periodo experimental para mantener su calidad como alimento.

Evaluamos cuatro tratamientos: T1, líquido miscible del extracto puro de *Origanum vulgare*; T2, concentrado soluble obtenido del residuo de la extracción; T3, insecticida comercial a base de Praletrina (0,1%) y d-Fenotrina (0,125%), adquirido en presentación de aerosol para uso doméstico (control positivo); y T4, testigo sin aplicación de insecticidas.

En los tratamientos T1 y T2 aplicamos 0,5mL del producto directamente sobre las rodajas de zanahoria mediante un gotero, con el fin de favorecer la exposición por ingestión. Adicionalmente, realizamos una aspersión uniforme de 1,0mL sobre el interior de cada unidad

experimental utilizando un atomizador plástico manual de pequeña capacidad, procurando distribuir homogéneamente el producto sobre la superficie de la bandeja y el alimento. El tratamiento T3 se aplicó utilizando el mismo volumen total, previamente transferido del envase comercial a un recipiente limpio y posteriormente al mismo atomizador manual, con el propósito de mantener una dosificación uniforme entre todos los tratamientos. El tratamiento T4 no recibió aplicación de ningún producto.

Seleccionamos el insecticida comercial como control positivo para comparar la eficacia insecticida de los productos derivados de *O. vulgare* con la de un insecticida de uso convencional. Asimismo, elegimos la aplicación sobre el alimento y mediante aspersión para simular dos posibles vías de exposición de las larvas (ingestión y contacto), lo que permitió una evaluación más representativa de la actividad insecticida de los tratamientos. Posteriormente, introdujimos diez larvas homogéneas de *T. molitor* en cada unidad experimental, para un total de 160 individuos evaluados. Distribuimos aleatoriamente las unidades experimentales y las evaluamos durante seis días consecutivos. Cada 24 horas registramos el número de larvas vivas y muertas. Consideramos como larva muerta aquella que no presentó movimiento al ser estimulada suavemente con una pinza entomológica. Finalmente, corregimos los porcentajes de mortalidad con respecto a la mortalidad natural observada en el tratamiento testigo.

### Análisis estadístico

Los datos de mortalidad y supervivencia de *T. molitor* los analizamos mediante estadística descriptiva y modelos inferenciales utilizando el software R. Los porcentajes de mortalidad y supervivencia se calcularon a partir del número de insectos muertos y vivos registrados en cada unidad experimental, respectivamente. Antes de realizar los análisis inferenciales, se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Se emplearon dos enfoques estadísticos complementarios. Inicialmente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para comparar las medias de los porcentajes de mortalidad y supervivencia entre tratamientos. Debido a que las observaciones originales correspondieron a conteos de insectos vivos y muertos, los cuales siguen una distribución binomial, ajustamos además un modelo lineal generalizado (GLM) con distribución binomial y función de enlace logit. Este modelo nos permitió estimar directamente la probabilidad de mortalidad en función de los tratamientos y constituye un enfoque más adecuado para datos proporcionales que el análisis basado únicamente en porcentajes. Finalmente, las comparaciones entre tratamientos las realizamos mediante medias marginales estimadas con ajuste de Tukey.

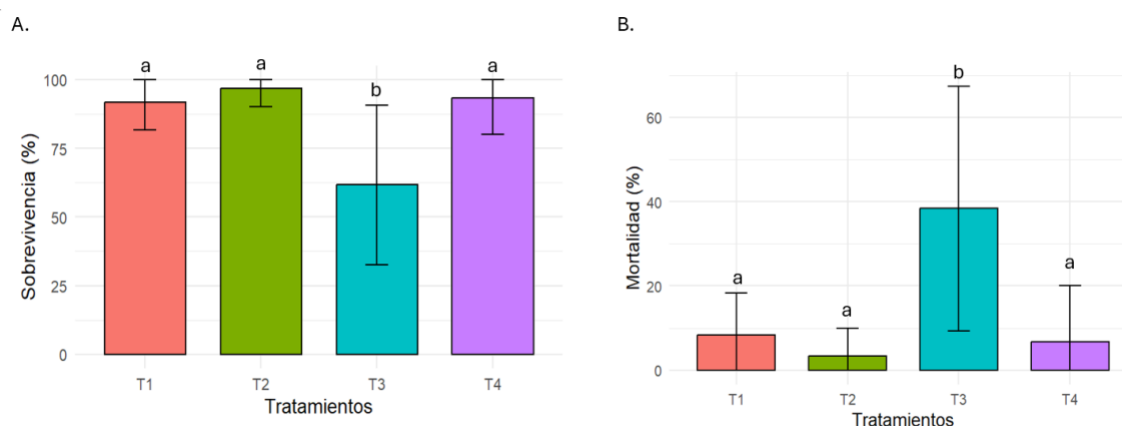
## RESULTADOS

Aplicamos un análisis de varianza el cual mostró que los tratamientos evaluados tuvieron un efecto significativo sobre la mortalidad de *T. molitor* ( $F = 3,631$ ;  $p = 0,0451$ ). La variación observada entre tratamientos fue superior a la variación residual, indicando diferencias estadísticas en la respuesta biológica de los insectos frente a los tratamientos aplicados (Fig. 1). Los tratamientos T1 (líquido miscible del extracto puro de orégano), T2 (concentrado soluble del residuo del extracto) y T4 (testigo) presentaron los mayores porcentajes de supervivencia, con valores superiores al 90%, sin diferencias estadísticas entre ellos (Fig. 1. A). En contraste, el tratamiento T3, correspondiente al insecticida comercial a base de Praletrina y d-Fenotrina, mostró la menor supervivencia (60%), diferenciándose significativamente de los demás tratamientos.

De manera complementaria, el porcentaje de mortalidad fue significativamente superior en T3, alcanzando valores cercanos al 40%, mientras que T1, T2 y T4 registraron mortalidades inferiores



al 10%, sin diferencias significativas entre sí (Fig. 1. B.). Estos resultados evidencian una mayor efectividad insecticida del tratamiento comercial respecto a los productos derivados de *Origanum vulgare* evaluados bajo las condiciones experimentales del estudio.



**Fig. 1.** Porcentaje de supervivencia (A) y mortalidad (B) de *T. molitor* expuesto a diferentes tratamientos insecticidas. T1: líquido miscible del extracto puro de orégano; T2: concentrado soluble del residuo del extracto; T3: insecticida comercial (Praletrina y d-Fenotrina); T4: testigo. Barras representan media  $\pm$  desviación estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

El modelo lineal generalizado con distribución binomial evidenció diferencias significativas en la probabilidad de mortalidad de *T. molitor* entre los tratamientos evaluados. Las medias marginales estimadas mostraron que el tratamiento T3 presentó el mayor efecto insecticida (media marginal estimada =  $-0,475 \pm 0,266$ ), mientras que T2 registró la menor probabilidad de mortalidad (media marginal estimada =  $-3,367 \pm 0,719$ ). Los tratamientos T1 y T4 presentaron valores intermedios, con medias marginales estimadas de  $-2,398 \pm 0,467$  y  $-2,639 \pm 0,518$ , respectivamente. Las comparaciones múltiples ajustadas mediante el método de Tukey indicaron diferencias significativas entre T3 y los demás tratamientos. En particular, T3 difirió significativamente de T1 ( $z = -3,578$ ;  $p = 0,0020$ ), T2 ( $z = -3,772$ ;  $p = 0,0009$ ) y T4 ( $z = 3,720$ ;  $p = 0,0011$ ). Por el contrario, no se detectaron diferencias significativas entre T1 y T2 ( $p = 0,6707$ ), T1 y T4 ( $p = 0,9858$ ), ni entre T2 y T4 ( $p = 0,8441$ ). En conjunto, estos resultados confirman que el tratamiento T3 presentó la mayor probabilidad de mortalidad y, por tanto, el mayor efecto insecticida sobre *T. molitor* en comparación con los demás tratamientos evaluados.

## DISCUSION

Los resultados de este estudio demostraron que, si bien existe un efecto significativo de los tratamientos sobre la mortalidad de *T. molitor* ( $p = 0,0451$ ), la eficacia de los derivados de *O. vulgare* bajo las formulaciones evaluadas fue marcadamente inferior a la del insecticida comercial. La superioridad del tratamiento T3 puede atribuirse a la acción sinérgica de la Pralletrina y la d-Fenotrina.

Estos compuestos son piretroides sintéticos diseñados para una rápida neurotoxicidad, actuando sobre los canales de sodio de las membranas de las células nerviosas, lo que provoca una parálisis inmediata y una alta probabilidad de muerte en coleópteros de productos almacenados (Korunić et al., 2020). En contraste, la baja efectividad observada en los extractos de *O. vulgare* en

este experimento difiere de reportes previos en la literatura, donde el aceite esencial de orégano ha mostrado una alta toxicidad por contacto contra *T. molitor*, con tasas de supervivencia que caen drásticamente a medida que aumenta la dosis (Plata-Rueda et al., 2021; Wang et al., 2015).

Una posible explicación para la baja mortalidad registrada en T1 y T2 radica en la naturaleza de las formulaciones utilizadas. La actividad insecticida del orégano está estrechamente ligada a su composición química, particularmente a la concentración de monoterpenos fenólicos como el carvacrol y el timol (Plata-Rueda et al., 2021; Qasim et al., 2024). Estudios previos han confirmado que el timol, de forma aislada, posee una alta toxicidad aguda contra larvas de *Tenebrio molitor*, logrando mortalidades superiores al 80% en concentraciones adecuadas (Toledo & Abreu, 2025).

Los resultados obtenidos mediante el modelo lineal generalizado con distribución binomial respaldan lo observado en el análisis de varianza, ya que T3 presentó la mayor probabilidad de mortalidad y difirió significativamente de todos los demás tratamientos. La ausencia de diferencias estadísticas entre T1, T2 y T4 refuerza la idea de que las formulaciones derivadas del orégano no ejercieron un efecto letal consistente sobre la población evaluada. Este comportamiento sugiere que el potencial insecticida de *O. vulgare* podría depender de ajustes en aspectos como dosis, concentración de metabolitos activos, tiempo de exposición o métodos de formulación que permitan mejorar la estabilidad y penetración de los compuestos bioactivos (Bumbulytė et al., 2023; Plata-Rueda et al., 2021).

A pesar de la baja eficacia observada, los aceites esenciales continúan representando una alternativa promisorio dentro del manejo integrado de plagas debido a su origen natural, menor persistencia ambiental y reducido riesgo de generación de resistencia en comparación con insecticidas sintéticos (Bumbulytė et al., 2023; Toledo & Abreu, 2025; Wang et al., 2015). En este contexto, futuras investigaciones deberían enfocarse en la caracterización química del extracto utilizado, particularmente en la cuantificación de timol y carvacrol, así como en la evaluación de concentraciones superiores o combinaciones con agentes sinérgicos que potencien la actividad insecticida. También sería importante evaluar otros métodos de aplicación y diferentes estados de desarrollo del insecto, ya que la susceptibilidad puede variar entre larvas y adultos.

No obstante, pese a la baja mortalidad directa, no se debe descartar el potencial de los derivados de *O. vulgare* en el manejo integrado de plagas debido a su origen natural, menor persistencia ambiental y reducido riesgo de generación de resistencia en comparación con insecticidas sintéticos (Wanna et al., 2025). Aunque la toxicidad por contacto fue limitada en las condiciones evaluadas, el aceite de orégano es reconocido por inducir efectos subletales, tales como la reducción de la tasa respiratoria, la alteración de patrones de movimiento y una marcada repelencia conductual en larvas y adultos de *T. molitor* (Plata-Rueda et al., 2021). Estos efectos pueden ser cruciales para reducir la infestación de productos almacenados sin depender exclusivamente de la mortalidad inmediata que ofrecen los insecticidas sintéticos (Plata-Rueda et al., 2017).

En conclusión, bajo las condiciones experimentales de este estudio, el insecticida comercial basado en piretroides fue el único tratamiento capaz de reducir significativamente la supervivencia de *T. molitor*. Se sugiere que futuras investigaciones evalúen formulaciones con mayor carga de carvacrol y timol, o el uso de nanoemulsiones para mejorar la estabilidad y penetración de los metabolitos del orégano, lo cual ha demostrado mejorar la eficacia de otros aceites esenciales contra este escarabajo.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Laboratorio de Química, de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Estatal a Distancia por la guía y colaboración en la extracción del aceite esencial.

## DECLARACIÓN SOBRE ÉTICA, CONFLICTO DE INTERESES Y FINANCIACIÓN

Los autores declaramos haber cumplido íntegramente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes durante la ejecución del estudio y la elaboración del manuscrito. Asimismo, manifestamos que no existen conflictos de interés de ningún tipo y que todas las fuentes de financiamiento han sido indicadas de manera clara y completa en la sección de agradecimientos. Todos los autores estamos de acuerdo con la versión final editada del artículo. El documento firmado correspondiente ha sido archivado en los registros de la revista.

La contribución de cada autor fue la siguiente: E.G.B.: montaje del experimento, recolección y análisis de datos, así como preparación y aprobación final del manuscrito. J.A.R.CH.: asesoría durante todo el proceso investigativo, además de la preparación y aprobación final del manuscrito.

## REFERENCIAS

- Barnes, A. I., & Siva-Jothy, M. T. (2000). Density-dependent prophylaxis in the mealworm beetle *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae): Cuticular melanization is an indicator of investment in immunity. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 267(1439), 177–182. <https://doi.org/10.1098/rspb.2000.0984>
- Boyer, S., Zhang, H., & Lempérière, G. (2012). A review of control methods and resistance mechanisms in stored-product insects. *Bulletin of Entomological Research*, 102(2), 213–229. <https://doi.org/10.1017/S0007485311000654>
- Brito, V. D., Achimón, F., Pizzolitto, R. P., Ramírez Sánchez, A., Gómez Torres, E. A., Zygadlo, J. A., & Zunino, M. P. (2021). An alternative to reduce the use of synthetic insecticide against the maize weevil *Sitophilus zeamais* through the synergistic action of *Pimenta racemosa* and *Citrus sinensis* essential oils with chlorpyrifos. *Journal of Pest Science*, 94(2), 409–421. <https://doi.org/10.1007/s10340-020-01264-0>
- Bumbulytė, G., Būdienė, J., & Būda, V. (2023). Essential oils and their components control behaviour of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) larvae. *Insects*, 14(7), 636. <https://doi.org/10.3390/insects14070636>
- Campolo, O., Giunti, G., Russo, A., Palmeri, V., & Zappalà, L. (2018). Essential oils in stored product insect pest control. *Journal of Food Quality*, 2018, 1–18. <https://doi.org/10.1155/2018/6906105>
- Chaudhari, A. K., Singh, V. K., Kedia, A., Das, S., & Dubey, N. K. (2021). Essential oils and their bioactive compounds as eco-friendly novel green pesticides for management of storage insect pests: Prospects and retrospects. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(15), 18918–18940. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12841-w>



- Ebadollahi, A., Ziaee, M., & Palla, F. (2020). Essential oils extracted from different species of the Lamiaceae plant family as prospective bioagents against several detrimental pests. *Molecules*, 25(7), 1556. <https://doi.org/10.3390/molecules25071556>
- Flinn, P. W., Hagstrum, D. W., Reed, C., & Phillips, T. W. (2003). United States Department of Agriculture—Agricultural Research Service stored-grain areawide integrated pest management program. *Pest Management Science*, 59(6–7), 614–618. <https://doi.org/10.1002/ps.695>
- Goulson, D. (2013). An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. *Journal of Applied Ecology*, 50(4), 977–987. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12111>
- Guo, Z., Pfohl, K., Karlovsky, P., Dehne, H.-W., & Altincicek, B. (2018). Dissemination of *Fusarium proliferatum* by mealworm beetle *Tenebrio molitor*. *PLOS ONE*, 13(9), e0204602. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204602>
- Houbraken, M., Spranghers, T., De Clercq, P., Cooreman-Algoed, M., Couchement, T., De Clercq, G., Verbeke, S., & Spanoghe, P. (2016). Pesticide contamination of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) for human consumption. *Food Chemistry*, 201, 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.097>
- Kavallieratos, N. G., Eleftheriadou, N., Filintas, C. S., Boukouvala, M. C., Gidari, D. L. S., Skourti, A., Ntinokas, D., Ferrati, M., Spinozzi, E., Petrelli, R., & Maggi, F. (2025). The potency of essential oils in combating stored-product pests: From nature to nemesis. *Plants*, 14(2), 192. <https://doi.org/10.3390/plants14020192>
- Korunić, Z., Liška, A., Lucić, P., Hamel, D., & Rozman, V. (2020). Evaluation of diatomaceous earth formulations enhanced with natural products against stored-product insects. *Journal of Stored Products Research*, 86, 101565. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.101565>
- Mohammed, M. E. A., El-Shafie, H. A. F., & Alhajhoj, M. R. (2020). Design and efficacy evaluation of a modern automated controlled atmosphere system for pest management in stored dates. *Journal of Stored Products Research*, 89, 101719. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101719>
- Morrison, W. R., Scully, E. D., & Campbell, J. F. (2021). Towards developing areawide semiochemical-mediated, behaviorally based integrated pest management programs for stored product insects. *Pest Management Science*, 77(6), 2667–2682. <https://doi.org/10.1002/ps.6289>
- Mrabet, A., Annaz, H., Abdelfattah, B., Ouabou, M., Kounnoun, A., Cacciola, F., Simou, A., Bouayad, N., Rharrabe, K., & Khaddor, M. (2025). Antioxidant, insecticidal, antifeedant, and repellent activities of oregano (*Origanum vulgare*). *International Journal of Environmental Health Research*, 35(2), 382–397. <https://doi.org/10.1080/09603123.2024.2355292>



- Nayak, M. K., Daglish, G. J., Phillips, T. W., & Ebert, P. R. (2020). Resistance to the fumigant phosphine and its management in insect pests of stored products: A global perspective. *Annual Review of Entomology*, 65(1), 333–350. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025047>
- Neethirajan, S., Karunakaran, C., Jayas, D. S., & White, N. D. G. (2007). Detection techniques for stored-product insects in grain. *Food Control*, 18(2), 157–162. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2005.09.008>
- Plata-Rueda, A., Martínez, L. C., Santos, M. H. dos, Fernandes, F. L., Wilcken, C. F., Soares, M. A., Serrão, J. E., & Zanoncio, J. C. (2017). Insecticidal activity of garlic essential oil and its constituents against the mealworm beetle *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae). *Scientific Reports*, 7(1), 46406. <https://doi.org/10.1038/srep46406>
- Plata-Rueda, A., Zanoncio, J. C., Serrão, J. E., & Martínez, L. C. (2021). *Origanum vulgare* essential oil against *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae): Composition, insecticidal activity, and behavioral response. *Plants*, 10(11), 2513. <https://doi.org/10.3390/plants10112513>
- Qasim, M., Islam, W., Rizwan, M., Hussain, D., Noman, A., Khan, K. A., Ghramh, H. A., & Han, X. (2024). Impact of plant monoterpenes on insect pest management and insect-associated microbes. *Heliyon*, 10(20), Article e39120. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39120>
- Toledo, A. M., & Abreu, P. de. (2025). Natural biopesticide: Thymol's efficacy on beetle *Tenebrio molitor*. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 97(suppl. 4). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202520250438>
- Vincent, C., Hallman, G., Panneton, B., & Fleurat-Lessard, F. (2003). Management of agricultural insects with physical control methods. *Annual Review of Entomology*, 48(1), 261–281. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.48.091801.112639>
- Wang, X., Hao, Q., Chen, Y., Jiang, S., Yang, Q., & Li, Q. (2015). The effect of chemical composition and bioactivity of several essential oils on *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Insect Science*, 15(1), 116. <https://doi.org/10.1093/jisesa/iev093>
- Wanna, R., Bunphan, D., Kunlanit, B., Khaengkhan, P., Khaengkhan, P., & Bozdoğan, H. (2025). Chemical composition of essential oil from *Apium graveolens* L. and its biological activities against *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Dryophthoridae). *Plants*, 14(3), 347. <https://doi.org/10.3390/plants14030347>