



Insecticidas naturales: la defensa química de las plantas



Carlos Alberto López Rosas. IRed de estudios moleculares avanzados, Instituto de Ecología (INECOL, A. C.). Xalapa, Veracruz, México.

e-mail: Carloslopez02@uv.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5427-6377>

Sared Helena Rodríguez-Becerra. Laboratorio de Química Orgánica, Instituto de Ecología (INECOL, A. C.). Xalapa, Veracruz, México.

e-mail: sared.rodriguez@posgrado.ecologia.edu.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4548-1069>

Fabiola Hernández Rosas. Centro de investigación, Universidad Anáhuac Querétaro, El Marqués, Querétaro, México.

e-mail: fabiola.hernandezro@anahuac.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2287-7041>

Eduardo Antonio Ortega Santana. Laboratorio de Química Orgánica, Instituto de Ecología (INECOL, A. C.). Xalapa, Veracruz, México.

e-mail: eduardo.ortega@posgrado.ecologia.edu.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5833-8475>

José Luis Olivares Romero. Laboratorio de Química Orgánica, Instituto de Ecología (INECOL, A. C.). Xalapa, Veracruz, México.

e-mail: jose.olivares@inecol.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7389-3514>

Resumen

El control de plagas es esencial para la agricultura y la seguridad alimentaria; sin embargo, el uso intensivo de insecticidas sintéticos ha favorecido la resistencia en insectos, efectos adversos en organismos no objetivo y un mayor impacto ambiental. Las plantas representan una fuente natural de compuestos bioactivos a través de sus metabolitos secundarios, los cuales participan en la defensa química y en la comunicación planta-insecto. Terpenos, fenoles, alcaloides, glucosinolatos y saponinas muestran actividad insecticida y ofrecen alternativas dentro del manejo integrado de plagas. No obstante, su uso requiere evaluaciones rigurosas. Entonces, ¿lo “natural” siempre es mejor y más seguro?

Palabras clave

Metabolitos secundarios; Insecticidas naturales; Comunicación planta-insecto; Biopesticidas.

Cite este artículo así:

APA: López-Rosas, C. Rodríguez-Becerra, S. Hernández-Rosas, F. Ortega-Santana, E. Olivares-Romero, J. (2026). *Insecticidas naturales: la defensa química de las plantas*. *Quimiofilia*, 2026, 5, (1), 5-11.

MDPI y JACS: López-Rosas, C.; Rodríguez-Becerra, S.; Hernández-Rosas, F.; Ortega-Santana, E.; Olivares-Romero, J. *Quimiofilia*, 2026, 5, 1, 5-11.

DOI: <https://doi.org/10.56604/qfla202651511>

Recibido: 12 de febrero 2026. Aceptado: 4 de mayo 2026.

Publicado. 14 de mayo de 2026.

www.quimiofilia.com. ISSN: 2683-2364. Registro IMPI: 2052060
QUIMIOFILIA. Reserva de derechos al uso exclusivo 2022: 04-2019-062013201300-203



Introducción

La creciente resistencia de las plagas a los plaguicidas convencionales plantea una cuestión central para la química contemporánea y para los sistemas agroalimentarios actuales: ¿puede mantenerse la seguridad alimentaria mundial cuando este proceso reduce simultáneamente la productividad agrícola y compromete la biodiversidad?^{1,2} Este interrogante no se limita a un problema de eficacia técnica, sino que refleja una interacción prolongada entre los insectos y los compuestos químicos diseñados para controlarlos, la cual ha condicionado el desarrollo de las estrategias modernas de manejo de plagas y ha favorecido la aparición de respuestas adaptativas en las poblaciones expuestas.¹ La resistencia a los insecticidas constituye hoy una amenaza directa tanto para la producción agrícola como para el control de enfermedades transmitidas por vectores, ya que la exposición reiterada a estos compuestos ha promovido la selección de mecanismos genéticos y bioquímicos que reducen su eficacia, entre los que destacan la desintoxicación mediada por enzimas y las modificaciones en los sitios moleculares de acción.¹ Este fenómeno se inserta en un contexto aún más complejo, donde factores externos como el cambio climático, la expansión de nuevas plagas y las crisis económicas influyen de manera determinante en la dinámica de los brotes y en la adopción de tecnologías de control en regiones particularmente vulnerables.² En este escenario, la necesidad de replantear el diseño y el uso de los plaguicidas se vuelve evidente. Más allá de su capacidad para eliminar organismos objetivo, resulta indispensable comprender los mecanismos moleculares que determinan su selectividad, con el fin de minimizar los efectos adversos sobre organismos no objetivo y reducir la contaminación ambiental asociada a su aplicación.³ La química moderna enfrenta así el reto de desarrollar estrategias de control más precisas, capaces de equilibrar eficacia biológica, seguridad ambiental y viabilidad agronómica. Paralelamente, la evidencia acumulada sobre los efectos colaterales de los insecticidas sintéticos ha puesto de manifiesto sus impactos negativos sobre distintos componentes de los ecosistemas, particularmente en ambientes acuáticos, donde compuestos como los neonicotinoides han demostrado causar alteraciones fisiológicas y neurotóxicas en especies no objetivo.⁴ Estos

efectos no solo comprometen la biodiversidad, sino que también retroalimentan la problemática de la resistencia, al reforzar la necesidad de reducir la dependencia exclusiva del control químico convencional. Como respuesta a estas limitaciones, los bioplaguicidas han emergido como alternativas relevantes dentro de enfoques de Agricultura Clímicamente Inteligente. En particular, los bioplaguicidas microbianos basados en bacterias, hongos y virus han demostrado una alta especificidad hacia el huésped y una rápida degradación biológica, características que disminuyen la acumulación de residuos tóxicos en el ambiente y reducen los riesgos para organismos no objetivo.⁵ No obstante, su adopción a gran escala continúa condicionada por factores técnicos, económicos y sociales que influyen en la toma de decisiones de los sistemas productivos.² De manera complementaria, el aprovechamiento de metabolitos secundarios de origen vegetal ha abierto nuevas posibilidades para el desarrollo de estrategias de control más sostenibles. Estos compuestos, resultado de procesos evolutivos asociados a la interacción entre plantas y herbívoros, desempeñan funciones defensivas clave y presentan una notable diversidad estructural y funcional, lo que los convierte en una fuente valiosa de principios activos con potencial insecticida.⁶ Avances recientes en el uso de nano-ensamblajes de azadiractina, regulados mediante metabolitos secundarios, ilustran cómo la integración de la química de productos naturales con herramientas tecnológicas permite mejorar la estabilidad, la adhesividad y la liberación controlada de estos compuestos, optimizando su desempeño en condiciones de campo.⁶ En conjunto, este panorama pone de relieve que, si bien los insecticidas continúan siendo herramientas esenciales, su empleo como estrategia única presenta limitaciones claras. La integración de conocimientos químicos, biológicos y ecológicos resulta fundamental para el diseño de enfoques de manejo de plagas más eficientes y sostenibles, capaces de responder a los desafíos actuales de la agricultura y de contribuir a la seguridad alimentaria global en un contexto de creciente presión ambiental.^{1,2}

La química detrás del control de plagas

Antes de continuar, debemos definir ¿qué es un insecticida? Un insecticida es cualquier sustancia diseñada para controlar

1. Al Naggat, Y.; Fahmy, N.; Alkhaibari, A.; Al-Akeel, R.; Alharbi, H.; Mohamed, A.; Eleftherianos, I.; El-Seedi, H.; Giesy, J.; Alharbi, H. Mechanisms and genetic drivers of resistance of insect pests to insecticides and approaches to its control. *Toxics*, **2025**, *13*(8), 681. <https://doi.org/10.3390/toxics13080681>
2. Fusar-Poli, E.; Campos, J.; Martínez Ferrer, M.; Rahmouni, R.; Rouis, S.; Yurtkuran, Z.; Fontefrancesco, M. The difficult decision of using biopesticides: A comparative case-study analysis concerning the adoption of biopesticides in the Mediterranean region. *Agriculture*, **2025**, *15*(6), 640. <https://doi.org/10.3390/agriculture15060640>
3. İnak, E.; De Rouck, S.; Van Leeuwen, T. Molecular mechanisms of pesticide selectivity: Insights from acaricide toxicology. *Pestic. Biochem. Physiol.*, **2025**, *213*, 106537. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2025.106537>

4. Mandal, A.; Sadhu, A.; Ghosh, S.; Saha, N.; Mossotto, C.; Pastorino, P.; Saha, S.; Faggio, C. Evaluating the impact of neonicotinoids on aquatic non-target species: A comprehensive review. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, **2025**, *113*, 104606. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2024.104606>
5. Tadesse Mawcha, K.; Malinga, L.; Muir, D.; Ge, J.; Ndolo, D. Recent advances in biopesticide research and development with a focus on microbials. *F1000Research*, **2025**, *13*, 1071. <https://doi.org/10.12688/f1000research.154392.5>
6. Zhang, X.; Xiao, J.; Huang, Y.; Liu, Y.; Hu, G.; Yan, W.; Yan, G.; Guo, Q.; Shi, J.; Han, R.; Li, J.; Tang, G.; Cao, Y. Sustainable pest management using plant secondary metabolites regulated azadirachtin nano-assemblies. *Nat. Commun.*, **2025**, *16*, 57028. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57028>



insectos que dañan cultivos o que transmitan enfermedades, estos incluyen formulaciones para erradicar huevos (ovicidas) y larvas (larvicidas). Un punto importante por destacar es que no son sustancias de reciente uso, sino que se tienen registros que datan de hace unos 4,500 años por los sumerios, ellos utilizaban compuestos de azufre para matar insectos y ácaros, por otro lado, los chinos hace 3,200 años usaban compuestos de mercurio y arsénico para controlar los piojos del cuerpo, pero no solo usaban compuestos inorgánicos, también hay reportes de uso de plantas como el crisantemo dalmata (*Chrysanthemum cinerariifolium*), se cuenta de la historia de una mujer alemana de Dubrovnik que recogió estas flores por su belleza y, tras marchitarse, notó que los insectos muertos se habían acumulado alrededor de los restos de la planta, lo que sugiere una posible capacidad para matar insectos, posteriormente se descubrió que la flor contenía hasta un 1,5% de piretrina, un compuesto insecticida activo.⁷ Ahora que ya sabemos que son, surge otra interrogante ¿Cómo funcionan?, sus acciones son principalmente sobre el sistema nervioso, el metabolismo energético y los reguladores del crecimiento, entre ellos se encuentran los organoclorados que actúan sobre los receptores GABA, impidiendo que los iones entren en las neuronas y provocando un estado de hiperexcitabilidad caracterizado por temblores y convulsiones,⁸ otro ejemplo lo constituyen los dinitrofenoles que actúan desacoplando o inhibiendo la fosforilación oxidativa, impidiendo la creación del trifosfato de adenosina (ATP), que es esencial para los seres vivos,⁹ por último, tenemos a las benzoilureas actúan como reguladores del crecimiento de insectos al interferir con la síntesis de quitina,¹⁰ sin esta los insectos no pueden desarrollar adecuadamente su exoesqueleto. Más ejemplos de mecanismo de acción los pueden ver en la (Figura 1).

Aunque los pesticidas se utilizan a nivel mundial, tanto para proteger los cultivos, como también proteger la salud humana, el uso de estos pueden generar efectos adversos en organismos no objetivo, como son los polinizadores, enemigos naturales, organismos acuáticos y vertebrados, alteran el equilibrio ecológico. Como ejemplo de lo anterior, se ha determinado que la exposición a corto y largo plazo de insecticidas genera disminución en la población de abejas, como también se han

observado cambios en el comportamiento de forrajeo (comportamiento natural de búsqueda, exploración, manipulación y consumo de alimentos en su entorno) y orientación, además los insecticidas de amplio espectro afectan a depredadores y parasitoides, reduciendo el control biológico natural de las plagas.¹¹ En este sentido, el uso de los insecticidas también puede generar resistencia, esto representa un desafío para el control de plagas y suele estar asociada a costos en la aptitud biológica (fitness), entendida como la capacidad de un organismo para sobrevivir, reproducirse y transmitir sus genes. En general, los insectos resistentes presentan menor fecundidad, desarrollo más lento y menor supervivencia en comparación con individuos susceptibles, especialmente en los órdenes Diptera, Hemiptera y Lepidoptera. No obstante, estos costos no son universales y varían según la clase de insecticida, el nivel de resistencia y el grupo taxonómico, lo que subraya la complejidad evolutiva de la resistencia y la necesidad de estrategias de manejo más sostenibles.¹² Estas limitaciones han impulsado el interés en insecticidas de origen natural, derivados de metabolitos secundarios, como una alternativa más selectiva y ambientalmente compatible.

Defensa química (Metabolitos secundarios)

Las plantas tienen un metabolismo altamente organizado, pudiendo dividirse en dos categorías. La primera consta de moléculas como lípidos, proteínas y carbohidratos, que están directamente relacionados con el crecimiento y desarrollo de la planta, actuando como la base metabólica indispensable, en cambio, la segunda participa activamente en la defensa, contribuyendo a la resistencia frente a condiciones ambientales adversas y ataques por organismos patógenos o herbívoros.¹³ Las plantas enfrentan estresores ambientales que condicionan su productividad y supervivencia, se distinguen a los originados por “organismos vivos” como insectos, hongos, bacterias, virus, nematodos y herbívoros que afectan tanto tejidos como metabolismo vegetal (Tipo biótico: seres vivos), por el contrario, los factores “no vivos” que alteran la fisiología vegetal, son la sequía, salinidad, frío, calor o metales pesados (Tipo abiótico: físicoquímico).¹⁴

7. Araújo, M.F.; Castanheira, E.M.S.; Sousa, S.F. The Buzz on Insecticides: A Review of the Mode of Action of Conventional and Natural Insecticides. *Molecules* **2023**, *28*, 3641. <https://doi.org/10.3390/molecules28083641>

8. Kaushik, P.; Kaushik, G. An Assessment of Structure and Toxicity Correlation in Organochlorine Pesticides. *J. Hazard. Mater.*, **2007**, *143*, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.08.073>

9. Pieper, G.R.; Casida, J.E. House Fly Adenosine Triphosphatases and Their Inhibition by Insecticidal Organotin Compounds. *J. Econ. Entomol.*, **1965**, *58*, 392–400. <https://doi.org/10.1093/jee/58.3.392>

10. Sun, R.; Liu, C.; Zhang, H.; Wang, Q. Benzoilurea Chitin Synthesis Inhibitors. *J. Agric. Food Chem.*, **2015**, *63*, 6847–6865. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02460>

11. Wan, N.-F.; Fu, L.; Dainese, M.; Kier, L.P.; Hu, Y.-Q.; Xin, F.; Goulson, D.; Woodcock, B. A.; Vanbergen, A. J.; Spurgeon, D. J.; Shen, S.; Scherber, C.

Pesticides Have Negative Effects on Non-Target Organisms. *Nat. Commun.* **2025**, *16*, 5732. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56732-x>

12. Brown, D.J.; Redak, R. A. Are Fitness Costs Associated with Insecticide Resistance? A Meta-Analysis. *J. Econ. Entomol.* **2025**, *118*, 1382–1394. <https://doi.org/10.1093/jee/toaf062>

13. Elshafie, H.S.; Camele, I.; Mohamed, A.A. A Comprehensive Review on the Biological, Agricultural and Pharmaceutical Properties of Secondary Metabolites Based-Plant Origin. *Int. J. Mol. Sci.* **2023**, *24*, 3266. <https://doi.org/10.3390/ijms24043266>

14. Singh, A.; Sharma, S.; Kumar, A.; Singh, N.; Singh, R.; Verma, R. Secondary Metabolites in Plants—The Weapons for Biotic Stress Tolerance. *Metabolites*, **2023**, *13*(6), 716. <https://doi.org/10.3390/metabo13060716>



MECANISMOS DE ACCIÓN DE LOS INSECTICIDAS

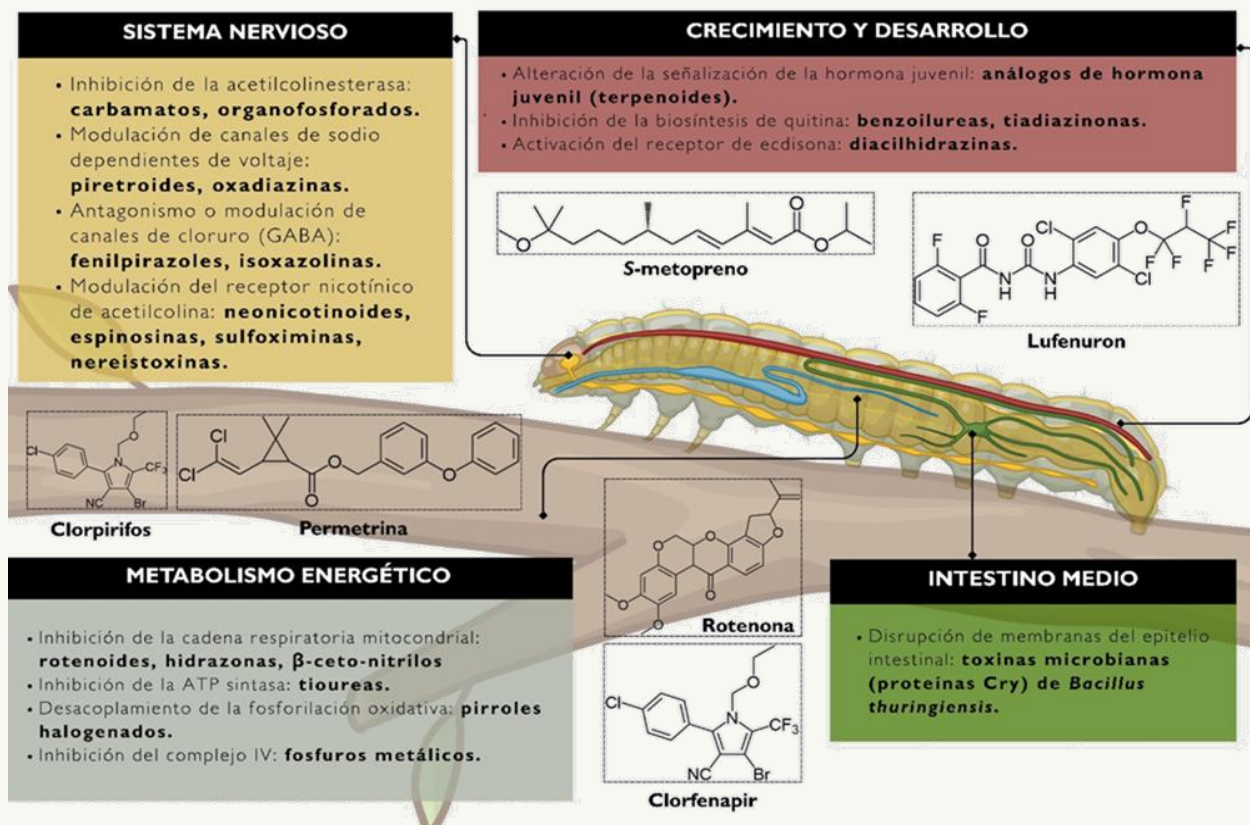


Figura 1. Principales mecanismos de acción de los insecticidas sobre insectos plaga. Los insecticidas ejercen sus efectos a través de distintos blancos fisiológicos. A nivel del sistema nervioso, incluyen la inhibición de la acetilcolinesterasa, la modulación de canales iónicos dependientes de voltaje y la interferencia con receptores neuronales, lo que provoca hiperexcitación y parálisis. Otros compuestos actúan sobre el metabolismo energético al inhibir la cadena respiratoria mitocondrial o desacoplar la fosforilación oxidativa, reduciendo la producción de ATP. Asimismo, los reguladores del crecimiento interfieren con la señalización hormonal y la biosíntesis de quitina, afectando el desarrollo y la muda. Finalmente, algunas toxinas microbianas alteran la integridad del epitelio intestinal. En conjunto, estos mecanismos explican la eficacia insecticida y los posibles efectos colaterales asociados a su uso (Creado en <https://BioRender.com> y CANVA).

Como ejemplo de cambios bióticos y abióticos, se tiene a los carbohidratos solubles, que contribuyen a la tolerancia al estrés osmótico que ocurre cuando hay poca agua en el ambiente, lo que dificulta que las células de la planta retengan agua. Estos carbohidratos ayudan como osmólitos compatibles (Aumenta la presión osmótica interna de la célula, sin dañarla), ayudando a la célula a conservar y atraer agua evitando que las células se deshidraten incluso en ambientes hostiles de sequedad, frío y salinidad, además estos carbohidratos actúan como antioxidantes, mediante la eliminación de especies reactivas de oxígeno (ROS), como H_2O_2 , O_2 y OH .¹⁵ La exposición a los factores bióticos y abióticos antes mencionados, también funcionan como señales que activan la biosíntesis del metabolismo secundario de las plantas,

dando lugar a la producción de metabolitos secundarios, los cuales generan medidas como repelencia, atracción de enemigos naturales o efectos tóxicos directos sobre los atacantes, actuando como señales químicas clave en la comunicación planta-insecto¹⁶ (Figura 2). Algunos ejemplos de metabolitos secundarios son los fenoles, alcaloides, glucósidos y terpenoides, los cuales a menudo se almacenan en estructuras especializadas como látex, tricomas o conductos de resina de las diferentes especies vegetales.¹⁴ Los terpenos y terpenoides participan en alelopatía (compuestos químicos que impiden el crecimiento de otras plantas a su alrededor), atracción de polinizadores y actividad insecticida; los fenoles y flavonoides presentan actividad antimicrobiana e insecticida; los aceites esenciales que son altamente

15. Shiade, S.R.G.; Zand-Silakhoor, A.; Fathi, A.; Rahimi, R.; Minkina, T.; Rajput, V. D.; Zulfikar, U.; Chaudhary, T. Plant metabolites and signaling pathways in response to biotic and abiotic stresses: Exploring biostimulant applications. *Plant Stress* **2024**, *12*, 100454. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100454>

16. Tumlinson, J.H. Complex and Beautiful: Unraveling the Intricate Communication Systems among Plants and Insects. *Annu. Rev. Entomol.* **2023**, *68*, 1–12. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-021622-111028>



volátiles, suelen actuar como toxinas para insectos, además de protegerlos contra ataques fúngicos (ejemplos: *Alternaria alternata*) o bacterianos (ejemplo: el mentol mostró un efecto antibacteriano sobre cepas de *Xanthomonas campestris* y *Pseudomonas syringae*); los alcaloides interfieren con procesos celulares fundamentales en insectos, generando neurotoxicidad, inhibición de la replicación del ADN, alteraciones en la síntesis de proteínas, entre otras afectaciones; los metabolitos azufrados como los glucosinolatos producen sustancias altamente tóxicas tras el daño por herbívoros; y las saponinas han demostrado la actividad contra los principales insectos herbívoros, como pulgones, gusanos de las hojas, termitas, gorgojos y barrenadores. Las saponinas lo logran disuadiendo o repeliendo a los insectos (actividad antialimentaria), vuelven más permeable el intestino e interrupción de la muda mediante la reducción del colesterol. Estos sistemas representan estrategias bioquímicas centrales para la protección de las plantas.^{17,18} Como ejemplos específicos, tenemos ciertas plantas como *Arabidopsis* que acumulan cumarinas hidroxiladas en forma de *Scopolin* que se acumulan en tallos y la raíz como parte de su defensa química, otro ejemplo es el ácido ferúlico, que actúa como precursor en la biosíntesis de lignina, este se presenta en la respuesta de defensa contra *Agrobacterium* en el trigo, también se observó un aumento en la deposición de lignina en *Pinus nigra* infectado con *Sphaeropsis sapinea*, como también lignificación en respuesta de defensa contra *Puccinia graminis* que infectaba trigo, finalmente flavonoides como kaempferol, genisteína, daidzeína, naringenina, rutina, luteolina y apigenina, han exhibido efectos antialimentarios significativos contra *Aphis gossypii*. Estos flavonoides impiden el asentamiento de los pulgones, reducen la duración de la alimentación del floema y disminuir la producción de melaza. Además, también afectan negativamente el crecimiento de los pulgones y la fecundidad de los adultos.^{19,20,21}

¿Los biopesticidas son mejores que los insecticidas sintéticos?

Los biopesticidas son un tipo de pesticidas provenientes de materiales naturales como plantas, animales, bacterias y ciertos minerales, y se utilizan para controlar plagas, empleando mecanismos menos tóxicos o más específicos que

los plaguicidas sintéticos convencionales.²² La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) clasifica a los biopesticidas en tres grupos principales según su naturaleza y modo de acción. En primer lugar, se encuentran los biopesticidas bioquímicos, que son sustancias naturales que controlan plagas por mecanismos no tóxicos, interfiriendo con el apareamiento, por ejemplo, o atrayendo a los insectos a trampas. En segundo lugar, se sitúan los biopesticidas microbianos, que contienen microorganismos como bacterias, hongos, virus o protozoos, y específicos de ciertos organismos plaga. Por último, se hallan las protecciones incorporadas por plantas (plant-incorporated protectants, PIPs), que son sustancias pesticidas que las propias plantas producen como resultado de haber sido modificadas genéticamente para expresar genes que confieren resistencia a plagas específicas.^{22,23} Más allá de su definición científica, el uso de biopesticidas también ha generado un debate en torno a la percepción pública de los productos “naturales” frente a los compuestos sintéticos. En los últimos años se ha creado una percepción generalizada de que todo aquello de “origen natural” es mejor para la salud humana y el ambiente. Sin embargo, esta idea deja de lado la realidad de numerosas sustancias naturales altamente tóxicas, como el veneno de serpiente, la cicuta, el tabaco o las aflatoxinas producidas por hongos, por mencionar algunos ejemplos. En este sentido, los biopesticidas han sido promovidos como alternativas “naturales” y, por

17. Lyubenova, A.; Georgieva, L.; Antonova, V. Utilization of Plant Secondary Metabolites for Plant Protection. *Biotechnol. Biotechnol. Equip.* **2023**, *37*, 2297533. <https://doi.org/10.1080/13102818.2023.2297533>
18. Shakeel, A.; Noor, J.; Jan, U.; Gul, A.; Handoo, Z.; Ashraf, N. Saponins, the Unexplored Secondary Metabolites in Plant Defense: Opportunities in Integrated Pest Management. *Plants* **2025**, *14*, 861. <https://doi.org/10.3390/plants14060861>
19. Bourgaud, F.; Hehn, A.; Larbat, R.; Doerper, S.; Gontier, E.; Kellner, S.; Matern, U. Biosynthesis of Coumarins in Plants: A Major Pathway Still to Be Unravellled for Cytochrome P450 Enzymes. *Phytochem. Rev.* **2006**, *5*(1), 293–308. <https://doi.org/10.1007/s11101-006-9040-2>
20. Moura-Sobczak, J.C.; Bonine, C.; Fernandes Viana, J.; Dornelas, M.; Mazzafra P. Abiotic and Biotic Stresses and Changes in the Lignin Content and

- Composition in Plants. *J. Integr. Plant Biol.*, **2010**, *52*(4), 360–376. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.00892.x>
21. Zhang, Y.; Wang, X.; Bian, Z.; Se, C.; Yang, G.; Lu, Y. Application of Flavonoid Compounds Suppresses the Cotton Aphid, *Aphis gossypii*. *Front. Plant Sci.* **2025**, *16*, 1545499. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1545499>
22. United States Environmental Protection Agency. *What Are Biopesticides?* <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/what-are-biopesticides> (accessed 2025-03-2026).
23. Shamsuddeen, R.; Mathew, T.; Haladu, M.; Ahmad, K.; Adam, A.; Abubakar, M. Recent Advances in Biopesticides: A Review of Efficacy and Environmental Impact. *Afr. J. Biochem. Mol. Biol. Res.*, **2024**, *1*(1), 706–725. <https://doi.org/10.58578/ajbmb.v1i1.3706>

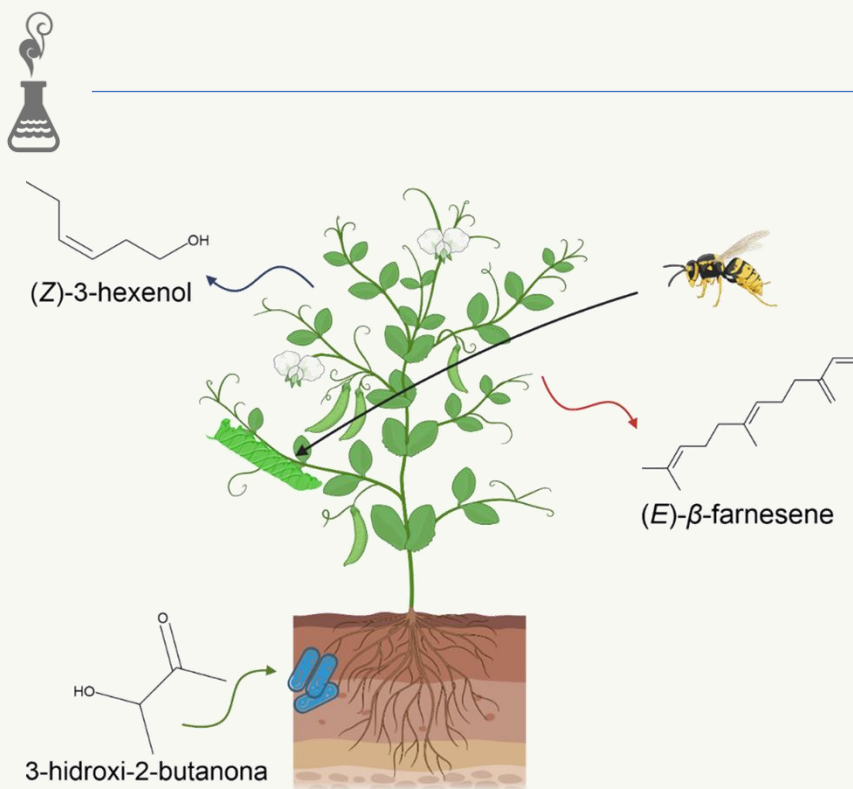


Figura 2. Ante el daño por herbivoría, la planta activa la biosíntesis y liberación de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) derivados del metabolismo secundario, estos atraen a los parasitoides, que pueden ser avispas, cuyas larvas se desarrollan dentro de plagas de insectos. Otros ejemplos de metabolitos son el (Z)-3-hexenol que se emite como señal temprana asociada al daño tisular, desencadenando respuestas de defensa contra *Bemisia tabaci* (mosca blanca del tabaco) en tomate (*Solanum lycopersicum*), lo que produce una disminución del peso, la alimentación y la oviposición en *B. tabaci*, mientras que el (E)-β-farnesene actúa como disuasivo de insectos herbívoros. Adicionalmente, algunas bacterias promueven el crecimiento vegetal, mediante la emisión de 3-hidroxi-2-butanona. En conjunto, estos compuestos funcionan como señales químicas que median la comunicación planta-insecto y contribuyen a la defensa vegetal, pudiendo ser fuente de inspiración para la creación de nuevos repelentes (Creado en <https://BioRender.com>).

tanto, seguras para la salud humana y el ambiente, teniendo supuestamente la capacidad para controlar plagas de manera efectiva sin dañar especies no objetivo y contribuyendo a la salud del ecosistema.^{24,25} Evidencia científica reciente muestra que estas afirmaciones no deben generalizarse, pues, si bien estos productos pueden degradarse más rápido que los pesticidas sintéticos, también pueden permanecer en cultivos, suelos y cuerpos de agua. Esto podría afectar organismos no objetivo y provocar impactos ecológicos relevantes.²⁶ Además, algunos biopesticidas pueden resultar tan biológicamente activos como los pesticidas convencionales, especialmente cuando se aplican en formulaciones comerciales completas. Los sistemas actuales de evaluación de seguridad no siempre logran detectar estos efectos, ya que se enfocan principalmente en la mortalidad y dejan de lado cambios más sutiles pero importantes, como alteraciones del comportamiento, del desarrollo, de la reproducción y del sistema inmune en organismos no objetivo.^{27,28,29} Un claro ejemplo de que los sistemas actuales de

evaluación de seguridad ambiental son deficientes para medir el riesgo ecológico de los biopesticidas, son los biopesticidas microbianos, ya que las guías de ensayo existentes no están adecuadamente diseñadas para microorganismos, dado que muchas derivan de metodologías pensadas para plaguicidas químicos. Esto conduce a resultados difíciles de interpretar, inconsistentes o poco representativos, especialmente en pruebas con organismos no objetivo.²⁷ Por ello, la comunidad científica advierte sobre la necesidad de mejorar los métodos de evaluación y actualizar las regulaciones, incorporando herramientas más sensibles que permitan identificar riesgos tempranos y asegurar que el uso de biopesticidas contribuya realmente a una agricultura más sostenible.²⁷⁻²⁹

Hacia los insecticidas del futuro

El desarrollo de insecticidas de próxima generación se orienta hacia enfoques más selectivos, biodegradables y compatibles con los ecosistemas, integrando avances en química, biotecnología, ciencias ómicas y herramientas

24. Areej, A.; Usama, M.; Zulfikar, U.; Sarwar, F.; Maryam; Ashiq, A. Biopesticides in Sustainable Agriculture: Enhancing Targeted Pest Control and Ecosystem Health. *Appl. Agric. Sci.*, **2024**, *1*, 1–6. <https://doi.org/10.25163/agriculture.2110006>

25. Ayilara, M.; Adeleke, B.; Akinola, S.; Fayose, C.; Adeyemi, U.; Gbadegesin, L.; Omole, R.; Johnson, R.; Uthman, Q.; Babalola, O.O. Biopesticides as a Promising Alternative to Synthetic Pesticides: A Case for Microbial Pesticides, Phytopesticides, and Nanobiopesticides. *Front. Microbiol.*, **2023**, *14*, 1040901. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1040901>

26. Arena, M.; Auteri, D.; Barmaz, S.; Brancato, A.; Brocca, D.; Bura, L.; Carrasco Cabrera, L.; Chiusolo, A.; Court Marques, D.; Crivellente, F.; De Lentdecker, C.; Egsmose, M.; Fait, G.; Ferreira, L.; Goumenou, M.; Greco, L.; Ippolito, A.; Istace, F.; Jarrar, S.; Kardassi, D.; Leuschner, R.; Lythgo, C.; Magrans, J. O.; Medina, P.; Miron, I.; Molnar, T.; Nougadere, A.; Padovani, L.; Parra Morte, J. M.; Pedersen, R.; Reich, H.; Sacchi, A.; Santos, M.; Serafimova,

R.; Sharp, R.; Stanek, A.; Streissl, F.; Sturma, J.; Szentes, C.; Tarazona, J.; Teron, A.; Theobald, A.; Vagenende, B.; Villamar-Bouza, L. Peer Review of the Pesticide Risk Assessment of the Active Substance Spinosad. *EFSA J.*, **2018**, *16*, e05252. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5252>

27. Karaoğlu, B.; Alkassab, A. T.; Borges, S.; Fisher, T.; Link-Vrabie, C.; McVey, E.; Ortego, L.; Nuti, M. Microbial Pesticides: Challenges and Future Perspectives for Non-Target Organism Testing. *Environ. Sci. Eur.*, **2024**, *36*, 1017. <https://doi.org/10.1186/s12302-024-01017-1>

28. Cappa, F.; Baracchi, D.; Cervo, R. Biopesticides and Insect Pollinators: Detrimental Effects, Outdated Guidelines, and Future Directions. *Sci. Total Environ.*, **2022**, *843*, 155714. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155714>

29. Rodrigues, S. Environmental Safety and Ecotoxicity of Biopesticides. *J. Biomed. Res. Environ. Sci.*, **2022**, *3*(10), 1229–1232. <https://doi.org/10.37871/jbres1582>



digitales. Entre las estrategias más prometedoras destaca la nanoformulación de metabolitos secundarios vegetales, que permite mejorar la estabilidad, solubilidad y liberación controlada de compuestos bioactivos, reduciendo las dosis requeridas en campo y minimizando la exposición de organismos no objetivo. La encapsulación en nanopartículas poliméricas, lipídicas o inorgánicas ofrece además protección frente a la degradación fotoquímica y térmica, incrementando la eficacia biológica bajo condiciones agrícolas reales. Otra línea emergente es la aplicación de herramientas genómicas y transcriptómicas para identificar blancos moleculares específicos en insectos plaga, lo que posibilita el diseño racional de compuestos inspirados en metabolitos naturales con mayor selectividad fisiológica. En este contexto, la química computacional y los algoritmos de inteligencia artificial están transformando la etapa de descubrimiento al permitir la predicción de afinidad molecular, toxicidad ambiental, biodegradabilidad y riesgo de resistencia mediante modelos *in silico*, cribados virtuales a gran escala y simulaciones de dinámica molecular, reduciendo tiempos, costos experimentales y el uso de ensayos animales.³⁰ En paralelo, el uso de edición génica y ARN interferente (RNAi) abre la puerta a formulaciones que silencien genes esenciales en insectos, reduciendo la dependencia de moléculas neurotóxicas de amplio espectro. También, los biopesticidas microbianos de nueva generación, obtenidos mediante ingeniería metabólica o consorcios microbianos diseñados, representan otra frontera tecnológica. Estos sistemas pueden optimizar la producción de toxinas naturales, enzimas insecticidas o metabolitos volátiles, así como modular interacciones ecológicas que favorezcan el control biológico. Finalmente, el empleo de sensores remotos, agricultura de precisión e inteligencia artificial permitirá ajustar la aplicación de insecticidas a la dinámica real de las poblaciones de plagas, evitando tratamientos innecesarios y disminuyendo la presión selectiva que conduce al desarrollo de resistencia.

Perspectivas

El futuro del control químico de plagas no reside en la sustitución simple de insecticidas sintéticos por productos “naturales”, sino en la integración de enfoques químicos, biológicos y ecológicos dentro de esquemas de manejo integrado de plagas. Los metabolitos secundarios de plantas constituyen una fuente inagotable de inspiración molecular, pero su incorporación exitosa dependerá de evaluaciones toxicológicas rigurosas, ensayos ecotoxicológicos sensibles y marcos regulatorios actualizados que consideren efectos subletales y crónicos en organismos no objetivo. Desde una perspectiva científica, será esencial profundizar en la

ecología química de las interacciones planta-insecto, comprender cómo los herbívoros evolucionan frente a estos compuestos y anticipar posibles mecanismos de resistencia. El acoplamiento entre química de productos naturales, modelado molecular y biología evolutiva permitirá diseñar estrategias más duraderas y resilientes. En el ámbito social y productivo, la adopción de estas tecnologías requerirá transferencia de conocimiento hacia productores, políticas públicas que fomenten prácticas sostenibles y una comunicación clara sobre los beneficios y limitaciones reales de los biopesticidas. Solo mediante este enfoque multidimensional será posible avanzar hacia sistemas agrícolas capaces de garantizar la seguridad alimentaria sin comprometer la biodiversidad ni la salud ambiental.

Conclusiones

El control químico de insectos plaga enfrenta actualmente un punto crítico, marcado por la rápida evolución de resistencia, los impactos en organismos no objetivo y la creciente presión por reducir la huella ambiental de las prácticas agrícolas. La evidencia presentada en este manuscrito muestra que, si bien los insecticidas sintéticos han sido herramientas fundamentales para la seguridad alimentaria global, su uso exclusivo resulta insostenible a largo plazo. Los metabolitos secundarios producidos por las plantas representan una fuente excepcional de diversidad química y funcional, resultado de millones de años de coevolución con herbívoros. Estos compuestos no solo participan en la defensa vegetal y en la comunicación química planta-insecto, sino que también ofrecen modelos moleculares valiosos para el diseño de nuevas generaciones de insecticidas más selectivos y compatibles con los ecosistemas. Asimismo, los biopesticidas (incluidos los de origen vegetal, microbiano y los incorporados en plantas) constituyen alternativas prometedoras dentro de esquemas de manejo integrado de plagas. No obstante, la literatura reciente advierte que su adopción debe ir acompañada de evaluaciones ecotoxicológicas rigurosas, regulaciones actualizadas y estudios de campo que consideren efectos subletales y crónicos en organismos no objetivo. En conjunto, el futuro del control de plagas dependerá de la integración de la química orgánica y de productos naturales, la química computacional, la biotecnología, la agricultura de precisión y la ecología evolutiva. Solo mediante este enfoque interdisciplinario será posible desarrollar estrategias verdaderamente sostenibles que mantengan la productividad agrícola, protejan la biodiversidad y respondan a los desafíos ambientales y sociales del siglo XXI.

Agradecimientos

SECIHTI, número de proyecto CBF-I-2025-246.

30. Djoumbou-Feunang, Y.; Wilmot, J.; Kinney, J.; Chanda, P.; Yu, P.; Sader, A.; Sharifi, M.; Smith, S.; Ou, J.; Hu, J.; Shipp, E.; Tomandl, D.; Kumpatla, S. P. Cheminformatics and Artificial Intelligence for Accelerating Agrochemical