

Funciones principales del perfil de metabolitos secundarios de *Trichoderma* spp. en el combate de plagas

Principal's functions of the secondary metabolites profile of *Trichoderma* spp. in pest control

Braulio E. Herrera-Cabrera ^a, Rafael Salgado-Garciglia ^b, Adriana Delgado-Alvarado ^c, Alejandra Hernández-García ^d, Luis G. López-Valdez ^e, Hebert J. Barrales-Cureño ^f

Abstract:

Trichoderma is a cosmopolitan filamentous fungus of agricultural importance. In Mexico, studies involving *Trichoderma* spp. focus on its effectiveness as a biological control agent against diseases in agricultural crops. The ecological and biological importance of this valuable fungus lies in its ability to restore and preserve soil microbiota, improving the nutritional efficiency of the soil. Its agricultural importance is highlighted in its use as a biocontrol agent, disease controller, biological control of phytopathogens, and vegetative growth promoter. The reproduction of the *Trichoderma* fungus to multiply and produce it in greater quantities can be done by homemade methods and in the laboratory. Applications can be made by spraying or watering the product at the base of the plant. This article highlights the profile of the secondary metabolites of *Trichoderma* spp. in the control of phytopathogens by inhibiting their growth and development, as well as the species most widely used in agriculture.

Keywords:

Biological control, secondary metabolites, mycoparasitism, *Trichoderma* spp.

Resumen:

Trichoderma es un hongo filamento cosmopolita de importancia agrícola. En México, los estudios que se abordan con *Trichoderma* spp. se orientan en su eficacia como agente de control biológico contra enfermedades en cultivos agrícolas. La importancia ecológica y biológica de este valioso hongo radica en que restaura y preserva la microbiota edafológica, presentando eficiencia en el uso nutrimental del suelo. La importancia agrícola se destaca en su uso como agentes de biocontrol, controlador de enfermedades, control biológico de fitopatógenos y promotores del crecimiento vegetativo. La reproducción del hongo *Trichoderma* para multiplicarlo y producirlo en mayor cantidad se puede realizar por método casero y en laboratorio. Las aplicaciones pueden realizarse mediante pulverizaciones o riegos del producto en la base de la planta. En este artículo se destaca el perfil de los metabolitos secundarios de *Trichoderma* spp. en el control de fitopatógenos inhibiendo su crecimiento y desarrollo así como las especies de mayor uso en agricultura.

Palabras Clave:

Control biológico, metabolitos secundarios, micoparasitismo, *Trichoderma* spp.

^a Colegio de Postgraduados | Programa en Estrategias de Desarrollo Agrícola Regional, Campus Puebla | Puebla, Puebla | México, <https://orcid.org/0000-0001-9670-8721>, Email: behc@colpos.mx

^b Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo | Instituto de Investigaciones Químico Biológicas | Morelia-Michoacán | México, <https://orcid.org/0000-0001-5920-6562>, Email: rafael.salgado@umich.mx

^c Colegio de Postgraduados | Programa en Estrategias de Desarrollo Agrícola Regional, Campus Puebla | Puebla, Puebla | México, <https://orcid.org/0000-0002-1815-8936>, Email: ada@colpos.mx

^d Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo | Instituto de Investigaciones Químico Biológicas | Morelia-Michoacán | México, <https://orcid.org/0000-0001-8353-0266>, Email: alejandra.hernandez@umich.mx

^e Universidad Autónoma de Chapingo | Laboratorio de Productos Naturales, Área de Química | Texcoco-Estado de México | México, <https://orcid.org/0000-0002-3238-5035>, Email: lgermanlv@gmail.com

^f Autor de Correspondencia, Tecnológico Nacional de México | Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Zamora | Zamora-Michoacán | México, <https://orcid.org/0000-0002-8431-2102>, Email: hebert.bc@zamora.tecnm.mx



Introducción

Trichoderma es un género que pertenece al Reino de los Hongos, División: Ascomycota, Subdivisión: Pezizomycotina, Clase: Sordariomycetes, Orden: Hypocreales y Familia: Hypocreaceae. A nivel mundial, se describen y validan 375 especies en entornos marinos y terrestres. Las especies de este género exhiben una distribución cosmopolita, habitan en varios sustratos, incluidos campos agrícolas, pastizales, pantanos, bosques, pantanos, desiertos y cuerpos de agua. *Trichoderma* funciona con un papel importante en los ecosistemas y agroecosistemas al controlar las plagas (hongos, oomicetos, insectos plagas y nematodos) ya sea limitando su crecimiento por competencia (interacción entre organismos que luchan por un recurso limitado en un mismo ambiente), antibiosis (especie que produce una sustancia nociva para otra especie que compite con ella) o parasitismo (relación biológica entre dos seres vivos, en la cual el parásito, depende del otro, el huésped, y obtiene algún beneficio), o potenciando la protección de las plantas contra ellos, y enfermedades de las plantas, actuar como biofertilizante, degradar la materia orgánica y participar en interacciones multitróficas junto con los insectos 1.

La importancia ecológica y biológica de este valioso hongo radica en que restaura y preserva la microbiota edafológica, presentando eficiencia en el uso nutrimental del suelo. La importancia agrícola se destaca en su uso como agentes de biocontrol, controlador de enfermedades, control biológico de fitopatógenos y promotores del crecimiento vegetativo. La reproducción del hongo *Trichoderma* para multiplicarlo y producirlo en mayor cantidad se puede realizar por método casero y en laboratorio. Las aplicaciones pueden realizarse mediante pulverizaciones o riegos del producto en la base de la planta. En este artículo se destaca el perfil de los metabolitos secundarios de *Trichoderma* spp. en el control de fitopatógenos inhibiendo su crecimiento y desarrollo así como las especies de mayor uso en agricultura 2.

Control biológico de *Trichoderma*

El control biológico de las enfermedades de las plantas es una práctica respetuosa con el medio ambiente que suprime las poblaciones de fitopatógenos mediante otros organismos. Este control es importante para el desarrollo de una agricultura sostenible con menores costos ecológicos. La importancia, se debe a la creciente concienciación de que el uso de plaguicidas se asocia a riesgos para la salud humana y el medio ambiente. En México, los estudios probados con *T. spp.* por su eficacia como agente de control biológico se ve reflejado en enfermedades de cultivos tales como: hortalizas: lechuga (*L. sativa*), chile (*C. annuum*), cebolla (*A. cepa*), ajo (*A. sativum*); gramíneas: maíz (*Z. mays*); fabáceas: frijol (*P.*

vulgare), maní (*A. hypogaea*); árboles frutales: manzanas (*M. domestica*), plátanos (*M. × paradisiaca*), mango (*M. indica*); magueyes: agave (*A. tequilana*); lauraceae: canela (*C. verum*), aguacate (*P. americana*); malvaceae como el cacao (*T. cacao*); rubiaceae como el café (*C. arabica*) y de la familia botánica juglandaceae: nueces (*J. regia*) 3, 4.

Metabolitos secundarios de *Trichoderma* spp.

El efecto de los metabolitos secundarios como rasgo de biocontrol se puede probar como cultivos o extractos de hongos completos, como componentes individuales o como una mezcla de componentes que se identifican a partir del extracto completo. Numerosas especies de *Trichoderma* producen metabolitos secundarios pertenecientes al grupo de los terpenoides (terpenos modificados en el cual se han removido o reacomodado grupos metilo: CH₃), policétidos (compuestos orgánicos, con una cadena de unidades de metileno alternadas y de cetona), péptidos, alcaloides (compuestos orgánicos nitrogenados), lactonas (compuestos orgánicos cíclicos pertenecientes al grupo de los ésteres), pironas (compuestos químicos heterocíclicos con un anillo insaturado (doble o triple enlace) de 6 miembros con un grupo funcional cetona y 1 átomo de oxígeno), antraquinonas (compuestos químicos orgánicos, derivados del antraceno) y epipolitiodoxopiperazinas (compuestos químicos, caracterizados por un puente disulfuro interno dentro del anillo de piperazina) (Figura 1). Los terpenoides o isoprenoides investigados en *Trichoderma* incluyen diterpenos tetracíclicos (por ejemplo, harziandiona), sesquiterpenos, como las micotoxinas de los tricotecenos (tricodermina y harzianum A), así como el triterpreno (terpenos con 30 átomos de carbono) viridina. 5, 6

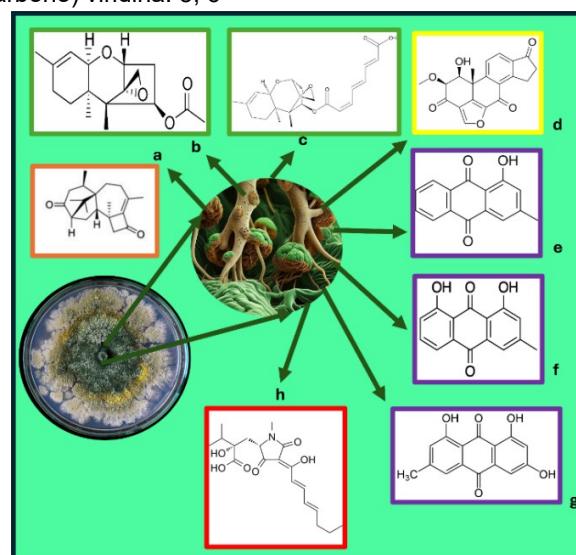


Figura 1. Metabolitos secundarios biosintetizados por el hongo *Trichoderma* spp.: a) Diterpenos tetracíclicos polioxigenados: harziandiona, b) sesquiterpenos, tales

como tricotecenos: c) tricodermina, d) harzianum; e) triterpeno: viridina; pigmentos antraquinonicos, tales como: f) pachibasina (antraquinona), g) crisofanol (antraquinona) y h) emodina (antraquinona). Fuente: Salazar-Magallón et al., 2024.

Las especies de *Trichoderma* de mayor uso en agricultura se presentan en la Figura 2.

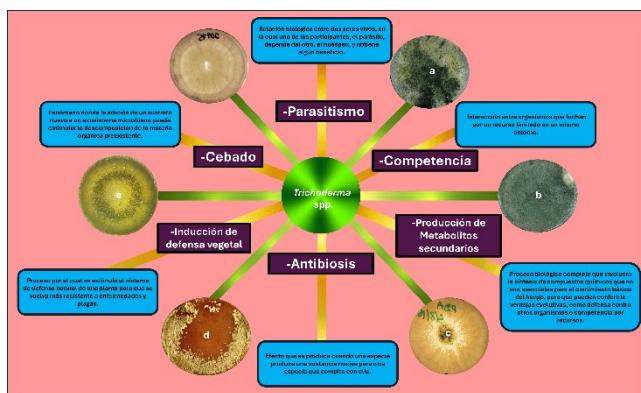


Figura 2. Especies de *Trichoderma* de mayor uso en agricultura. a) *T. atroviride*, b) *T. harzianum*, c) *T. asperellum*, d) *T. virens*, e) *T. longibrachiatum* y f) *T. viride*. Fuente: Andrade et al., 2019.

Además, las especies *T. viride*, *T. harzianum* y *T. koningii* producen el antibiótico volátil 6-fenil- α -pirona (6PAP), responsable del olor a coco y del control biológico contra *F. oxysporum*. *T. harzianum*, *T. viride* y *T. aureoviride* produciendo numerosos pigmentos de antraquinona, como paquibasina, crisofanol y emodina, con fuertes propiedades antagonistas contra hongos patógenos e intermedian en el enrollamiento micoparasitario. El metabolito conocido es la gliotoxina, aislado del hongo *Gliocladium fimbriatum* (taxonomizado como *T. virens*) del que se aisló originalmente la gliotoxina. La gliotoxina exhibe actividad inmunosupresora y es un factor de virulencia del patógeno humano *Aspergillus fumigatus*, pero también funciona en el control biológico debido a su elevada actividad fungitoxica (Figura 3). En la Figura 4 se presenta la biosíntesis de la gliotoxina a nivel celular. 7, 8

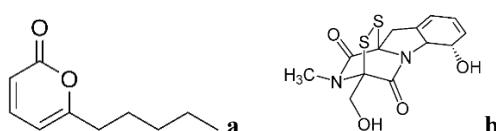


Figura 3. a) 6-fenil- α -pirona (6PAP) y b) gliotoxina. Fuente: Chemdraw.

En la Figura 4 se presenta la ruta de biosíntesis de la gliotoxina.

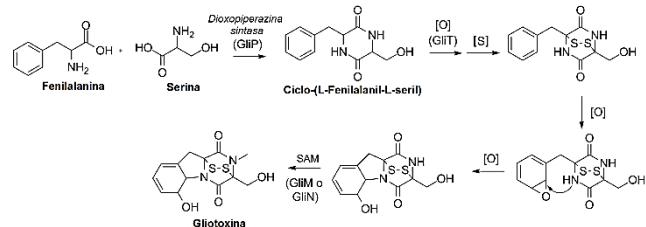


Figura 4. Biosíntesis de la Gliotoxina en el hongo *Trichoderma virens* al fusionarse los aminoácidos fenilalanina y serina con ayuda de la enzima dioxopiperazina sintasa. Fuente: Chemdraw.

Micoparasitismo de *Trichoderma* como factor decisivo en el biocontrol eficaz

El micoparasitismo es un fenómeno en el que un hongo antagonista (micoparásito) parasita a otro hongo (huésped). Los hongos del género *Trichoderma* se clasifican principalmente como micoparásitos necrótroficos. Se describieron más de 75 especies de *Trichoderma* con un elevado potencial micoparasitario. El efecto micoparasitario de los necrótroficos *Trichoderma* sobre los hongos patógenos incluye la detección de presas y la quimiotaxis (movimiento dirigido de un organismo hacia condiciones ambientales que considera atractivas y/o alejándose de entornos que considera repelentes), la adhesión al hospedador y el ataque físico mediante una intensa ramificación y enrollamiento alrededor de las hifas del hospedador. Además, *Trichoderma* forma estructuras de penetración similares a los apresorios, homólogas a los apresorios de los patógenos (Figura 5). El ataque químico y la degradación de la pared celular del patógeno por enzimas hidrolíticas y compuestos antifúngicos producidos por *Trichoderma* es la última fase de la interacción micoparasitaria, que dirige a la muerte del hospedador. *T. harzianum* es probablemente la especie que produce la mayor cantidad de metabolitos secundarios de entre las especies de *Trichoderma*. Los metabolitos secundarios de *T. harzianum* muestran actividad antifúngica, citotóxica y actividad antimicrobiana, entre otras propiedades. Hasta ahora, se han descrito cerca de 200 compuestos de *T. harzianum* 9, 10.

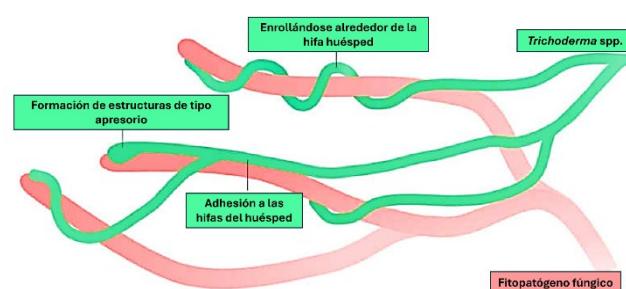


Figura 5. Mecanismo de *Trichoderma* ante el fitopatógeno fúngico. Fuente: Salazar-Magallón et al., 2024.

La pirona 6-PP se descubrió en un caldo de cultivo de *T. viride*, *T. koningii* y *T. harzianum*. 6pp disminuye el crecimiento del 31,7% y 69,6% en *F. oxysporum* y *R. solani*, respectivamente. En kiwis, se aplicó una dosis de 0,4 a 4 mg/ml que disminuyó la pudrición de *B. cinerea*. El análogo de *T. harzianum* y *T. longibrachiatum*, presentó actividad antifúngica contra *Armillaria mellea*. Otros metabolitos secundarios hidroderivados análogos como la massoilaactona y d-decanolactona mostraron actividad contra *Botrytis* y *Phytophtora spp.* La viridepironona producida *T. viride* inhibió el crecimiento en 90% de *S. rolfsii* a una concentración inhibitoria mínima de 196 mg/mL 11. Por lo tanto, el hongo *Trichoderma* spp. se perfila como un ícono para el combate de plagas y enfermedades fitopatológicas.

Referencias

- [1] Tyśkiewicz R, Nowak A, Ozimek E, Jaroszuk-Ścisiel, J. *Trichoderma*: The current status of its application in agriculture for the biocontrol of fungal phytopathogens and stimulation of plant growth. International Journal of Molecular Sciences 2022; 23(4): 2329. <https://doi.org/10.3390/ijms23042329>
- [2] Ahedo-Quero HO, Aquino-Bolaños T, Ortiz-Hernández YD, García-Sánchez, E. Trichoderma diversity in Mexico: A Systematic Review and Meta-Analysis. Diversity 2024; 16(1): 68. <https://doi.org/10.3390/d16010068>
- [3] Manzar N, Kashyap AS, Goutam RS, Rajawat MVS, Sharma PK, Sharma SK, Singh, HV. Trichoderma: advent of versatile biocontrol agent, its secrets and insights into mechanism of biocontrol potential. Sustainability 2022; 14(19): 12786. <https://doi.org/10.3390/su141912786>
- [4] Sánchez-Montesinos B, Santos M, Moreno-Gavira A, Marín-Rodulfo T, Gea FJ, Diáñez F. Biological control of fungal diseases by Trichoderma aggressivum f. europeaeum and its compatibility with fungicides. Journal of Fungi 2021; 7(8): 598. <https://doi.org/10.3390/jof7080598>
- [5] Khan RAA, Najeeb S, Hussain S, Xie B, Li, Y. Bioactive secondary metabolites from *Trichoderma* spp. against phytopathogenic fungi. Microorganisms 2020; 8(6): 817. doi: 10.3390/microorganisms8060817.
- [6] Guo R, Li G, Zhang Z, Peng, X. Structures and biological activities of secondary metabolites from *Trichoderma harzianum*. Marine Drugs 2022; 20(11): 701. <https://doi.org/10.3390/md20110701>
- [7] Degani O, Khatib S, Becher P, Gordani, A, Harris, R. *Trichoderma asperellum* secreted 6-pentyl- α -pyrone to control *Magnaportheopsis maydis*, the maize late wilt disease agent. Biology 2021; 10(9): 897. <https://doi.org/10.3390/biology10090897>
- [8] Teslya AV, Gurina EV, Stepanov AA, Iashnikov AV, Vasilchenko, AS. The microbiological activity of soil in response to gliotoxin, the “lethal principle” of *Trichoderma*. Agronomy 2024; 14(9): 2084. <https://doi.org/10.3390/agronomy14092084>
- [9] Wang Y, Zhu X, Wang J, Shen C, Wang, W. Identification of mycoparasitism-related genes against the phytopathogen *Botrytis cinerea* via transcriptome analysis of *Trichoderma harzianum* T4. Journal of Fungi 2023; 9(3): 324. doi: 10.3390/jof9030324.
- [10] Mitrović I, Čanak P, Tančić Živanov S, Farkaš H, Vasiljević M, Ćujić S, Zorić M, Mitrović, B. *Trichoderma harzianum* in biocontrol of maize fungal diseases and relevant mycotoxins: from the laboratory to the field. Journal of Fungi 2025; 11(6): 416. <https://doi.org/10.3390/jof11060416>
- [11] Carillo P, Woo SL, Comite E, El-Nakhel C, Rouphael Y, Fusco GM, Borzacchiello A, Lanzuise S, Vinale F. Application of *Trichoderma harzianum*, 6-pentyl- α -pyrone and Plant Biopolymer Formulations Modulate Plant Metabolism and Fruit Quality of Plum Tomatoes. Plants. 2020; 9(6): 771. <https://doi.org/10.3390/plants9060771>
- [12] Salazar-Magallón JA, Herrera-Cabrera BE, Salgado-Garciglia R, Hernández-García A, Delgado-Alvarado A, Mendoza-Mendoza A, Torres-García G, Huerta-de la Peña A, Barrales-Cureño, HJ. Chapter 8 - Study of *Trichoderma* microbial ecology and biotechnology, Editor(s): Ajay Kumar, Gustavo Santoyo, Joginder Singh, In Plant and Soil Microbiome, Biocontrol Agents for Improved Agriculture, Academic Press, 2024, Pages 181-213, ISBN 9780443151996, <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15199-6.00020-8>.
- [13] Andrade-Hoyos, P, Luna-Cruz, A, Osorio-Hernández, E, Molina-Gayoso, E, Landero-Valenzuela, N, Barrales-Cureño, H. J. Antagonism of *Trichoderma* spp. vs fungi associated with wilting of chilli. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 2019; 10(6), 1259-1272. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1326>