

Extractos y Metabolitos Antifúngicos de *Trichoderma asperellum* Samuels, Lieckf. & Nirenberg con Potencial Aplicación en el Control de Fitopatógenos Agrícolas Antifungal Extracts and Metabolites from *Trichoderma asperellum* Samuels, Lieckf. & Nirenberg with Potential Application in the Control of Agricultural Phytopathogens

Sandy Esther Celis-Perera¹ , Jairo Cristóbal-Alejo² ,
Irma Leticia Medina-Baizabal¹ y Marcela Gamboa-Angulo^{1*}

¹ Centro de Investigación Científica de Yucatán, Unidad de Biotecnología. Calle 43 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo. 97205, Mérida, Yucatán, México; (S.E.C.P.), (I.L.M.B.), (M.G.A.).

² Tecnológico Nacional de México/I. T. Conkal. Av. Tecnológico s/n. 97345, Conkal, Yucatán, México; (J.C.A.).

* Autora para correspondencia: mmargela@cicy.mx

RESUMEN

El crecimiento de la población demanda mayor suministro de alimentos. Por lo tanto, existe la necesidad de generar alternativas al uso de fungicidas sintéticos de bajo impacto ambiental, para el control de enfermedades en los cultivos agrícolas. El género *Trichoderma* está ampliamente reportado como microorganismo benéfico en la agricultura y como estrategia de control biológico contra fitopatógenos. El hongo *T. asperellum* biosintetiza metabolitos de naturaleza volátil y no volátil que son aprovechados por las plantas para la estimulación del crecimiento y para tolerar el ataque de patógenos. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue recopilar la información de los metabolitos volátiles y no volátiles reportados de *T. asperellum*, con uso potencial para el control de enfermedades con origen fúngico en cultivos agrícolas. Los artículos y patentes publicados entre 2014 y 2024, en cinco bases públicas y una comercial, se recopilaron en una base de datos. Los registros de "*Trichoderma*" y "*asperellum*", sobre el tipo de extracto, metabolito, actividad y sitio de aislamiento, indicaron un total de 702 metabolitos de *T. asperellum*. Doce cepas producen 622 metabolitos volátiles donde la 6-pentil- α -pirona es promotora del crecimiento vegetal y la más frecuentemente reportada con actividad antifúngica. Además, 80 metabolitos no volátiles de diferente naturaleza química detectados en nueve cepas de *T. asperellum*, con actividad contra hongos fitopatógenos. Entre las patentes, siete con el uso individual de *T. asperellum* para la producción de metabolitos con fines agrícolas. La purificación e identificación de los metabolitos activos detectados en los extractos deben realizarse para continuar con los estudios complementarios, como su estabilidad, mecanismo de acción y toxicidad. Los metabolitos secretados por *T. asperellum* presentan potencial para generar productos alternativos al uso de fungicidas sintéticos en el control de enfermedades fúngicas en los cultivos agrícolas.

Palabras clave: agricultura, biofertilizante, biotecnología, control biológico.

SUMMARY

Population growth demands an increased food supply. Therefore, there is a need to develop alternatives to synthetic fungicides with low environmental impact for controlling diseases in agricultural crops. The genus *Trichoderma* is widely reported as a beneficial microorganism in agriculture and as a biological control strategy against phytopathogenic fungi. The fungus *T. asperellum* biosynthesises metabolites that are utilized by plants to stimulate growth or to tolerate pathogen attacks. In accordance with the above, this study aimed to compile information on



Cita recomendada:

Celis-Perera, S. E., Cristóbal-Alejo, J., Medina-Baizabal, I. L., & Gamboa-Angulo, M. (2026). Extractos y Metabolitos Antifúngicos de *Trichoderma asperellum* Samuels, Lieckf. & Nirenberg con Potencial Aplicación en el Control de Fitopatógenos Agrícolas. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-18. e2308. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2308>

Recibido: 25 de junio de 2025.
Aceptado: 12 de octubre de 2025.
Revisión: Volumen 44.
Febrero de 2026.

Editor de Sección:
Dra. Silvana Vero Méndez

Editor Técnico:
Dra. Rosalía del Carmen Castelán Vega



Copyright: © 2026 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

the volatile and non-volatile metabolites reported for *T. asperellum* with potential use to control fungal diseases on agricultural crops. A database was compiled from articles and patents published between 2014 and 2024 in four public and two commercial databases. Records for '*Trichoderma*' and '*Trichoderma asperellum*' regarding extract type, metabolite, activity, and isolation site indicated a total of 702 metabolites from *T. asperellum*. A total of 622 volatile metabolites were produced by twelve strains, one of which, 6-pentyl- α -pyron, has been reported to promote plant growth and exhibit significant antifungal activity. In addition, 80 non-volatile metabolites of different chemical nature were detected in nine strains of *T. asperellum*, with activity against phytopathogenic fungi. Among the patents, seven relate to the individual use of *T. asperellum* for the production of metabolites for agricultural purposes. To continue with complementary studies, such as stability, mechanism of action, and toxicity, the active ingredients in the extracts should be purified and identified. The extracts and metabolites secreted by *T. asperellum* could provide an eco-friendly alternative to synthetic fungicides for controlling fungal diseases in crops.

Index words: agriculture, biofertilizers, biotechnology, biological control.

INTRODUCCIÓN

La agricultura es una de las principales actividades económicas en el mundo, gracias a esta práctica se obtienen la mayoría de los productos indispensables para la seguridad alimentaria de la población mundial. La gran extensión de monocultivos, las malas prácticas agrícolas y el cambio climático, son factores que incrementan la presencia de enfermedades de origen fúngico. Estas son controladas con fungicidas sintéticos de amplio espectro que afectan el microbioma de la rizosfera, inducen resistencia en las cepas patógenas, reportados como una fuente de contaminación ambiental y potencialmente dañinos para la salud humana (Manzar *et al.*, 2022; Beckerman, Palmer, Tedford y Ypema, 2023). En el último siglo el enfoque de instituciones gubernamentales para el control de plagas y enfermedades se dirige hacia un manejo integrado, implementando el uso de productos biológicos, entre ellos los microorganismos fúngicos (Stracquadano, Quiles, Meca y Cacciola, 2020; Baron y Rigobledo, 2022).

Las especies del género *Trichoderma* se caracterizan por ser hongos filamentosos que habitan principalmente en suelos ricos en materia orgánica, en la rizósfera y endosfera de las plantas, que a través de múltiples mecanismos de acción las protegen contra el daño de fitopatógenos y estimulan el crecimiento vegetal (Singh, Anbazhagan, Viswanath y Tomer 2020). Además, se ha documentado su uso como control biológico en sistemas agrícolas para reducir el inóculo de patógenos importantes, como *Fusarium* spp., mediante la aplicación de cepas antagonistas en residuos de cultivo (Cabrera, Garmendia, Rufo, Pereyra y Vero, 2020). Desde 2023, la FAO reconoció al género *Trichoderma* en un catálogo de insumos biológicos con fines de uso agrícola para el control de enfermedades causadas por *Alternaria alternata*, *Colletotrichum* spp., *Curvularia lunata*, *Fusarium* spp. y como promotoras de crecimiento vegetal (Zamora, Cabezas, Juárez, León y Martinuz, 2023). Por su capacidad biológica las especies *T. asperellum*, *T. atroviride*, *T. harzianum* y *T. virens* han sido más estudiadas. Aproximadamente 373 metabolitos volátiles y no volátiles de *Trichoderma* spp. se han reportado entre 2018 y 2022 (Guo *et al.*, 2023). Sin embargo, las estimaciones indican que *Trichoderma* spp. pueden producir 1000 o más metabolitos (Hermosa, Cardoza, Rubio, Gutierrez y Monte, 2014). Entre estos se han identificado compuestos nitrogenados, pironas, peptaiboles, sideróforos y terpenos, entre otros. Las propiedades como antibióticos, inductores de resistencia, quelantes de hierro, promotores de crecimiento en plantas, han sido atribuidas a una parte de estos metabolitos (López-Calva, Villa, Quezada, Mendoza y Anducho, 2018; Li, Li y Zhang, 2019; Shavkiev *et al.*, 2022).

Las cepas de *T. asperellum* están recibiendo atención de los investigadores por sus propiedades biológicas en el control de enfermedades de origen fúngico en el sector agrícola. En el estado de Yucatán se ha aislado la cepa endófito *T. asperellum* Ta13-17 con efecto antagonista contra *Corynespora cassiicola*, patógeno del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Celis-Perera *et al.*, 2023). Conforme a la expansión global y a la generación de tecnologías innovadoras se ha buscado la protección de la propiedad intelectual y del capital humano (Almendarez-Hernández, 2018). Una forma de proteger la información generada de las investigaciones científicas es mediante la obtención de patentes. Estas son un título de propiedad industrial que le otorga al autor el derecho

a actuar frente a terceros que copien o falsifiquen los productos o procedimientos protegidos por dicha patente sin su consentimiento (OEPM, 2018). De esta forma se protege la información generada de investigaciones que deriven en la creación de productos o servicios de valor agregado y que puedan ser una fuente de colaboración entre investigadores y el sector productivo (Jiménez-Valadez, 2025). Por lo anterior, el objetivo de esta revisión se enfocó en recopilar la información publicada de los metabolitos volátiles, no volátiles y de los extractos de *T. asperellum*, así como las patentes a nivel mundial con aplicaciones agrícolas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las revisiones se realizaron en el período de los años 2014 a 2024 en las plataformas Google scholar, Redalyc y Scopus para los artículos publicados, posteriormente se realizó una base de datos con todos los posibles metabolitos identificados en los artículos, etiquetados como volátiles y no volátiles tomando en cuenta el método de identificación (cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MS, por sus siglas en inglés) para metabolitos volátiles y cromatografía líquida de alta resolución acoplada a espectrometría de masas (HPLC-MS, por sus siglas en inglés, para no volátiles) y el resultado de los autores, se señaló su actividad en caso de estar reportada. Las patentes publicadas se consultaron en las plataformas Derwent Innovations y en el portal oficial Sistema de Información de la Gaceta de la Propiedad Industrial (SIGA) que pertenece al Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), la búsqueda en fichas se realizó usando como palabra clave *Trichoderma asperellum* en el buscador para desplegar un total de ocho patentes registradas. Las palabras clave usadas en ambas búsquedas fueron: antifúngicos, biofungicidas, control biológico, metabolitos volátiles, metabolitos no volátiles, *Trichoderma* y *Trichoderma asperellum*.

DESARROLLO DEL TEMA

Descripción de *Trichoderma*

El género *Trichoderma* se describió por primera vez en 1794 (Persoon, 1974); Rifai (1969), agrupó el género en nueve especies de acuerdo a sus características morfológicas en *Trichoderma aureoviride*, *T. hamatum*, *T. harzianum*, *T. koningii*, *T. longibrachiatum*, *T. piluliferum*, *T. polysporum*, *T. pseudokoningii* y *T. viride*. Posteriormente Lieckfeldt, Samuels, Nirenberg y Petrini (1999) observaron dos tipos de *T. viride* diferenciados por la rugosidad de la pared de los conidios, descubrieron que cada tipo posee un diseño de ADN mitocondrial diferencial. Las pruebas moleculares apoyan nombrar al tipo 1 como verdadero *T. viride*, anamorfo de *Hypocrea rufa* y al tipo 2 como una nueva especie a la que se nombró *T. asperellum* y de la cual hasta la fecha no se conoce su fase sexual (Samuels, Lieckfeldt y Nirenberg, 1999), siendo una de las 551 especies del género *Trichoderma* registradas a la fecha en el Index Fungorum (2025).

Descripción de *Trichoderma asperellum*

T. asperellum está clasificada taxonómicamente dentro de la división *Ascomycota* (orden *Hypocreales*), anamorfos de la familia *Hypocreaceae*. Es un hongo cosmopolita, reportado principalmente en zonas tropicales, se adapta y desarrolla a diferentes temperaturas, su rango óptimo de crecimiento se encuentra entre 25 y 30 °C, su tolerancia de pH entre 5 y 7, lo que favorece su establecimiento en diferentes sustratos y medios de cultivo (Figura 1). Son hongos saprófitos que se encuentran sobre materia orgánica vegetal, como endófitos avirulentos de plantas o incluso en ambientes marinos; estas capacidades adaptativas les dan la oportunidad de colonizar diferentes nichos ecológicos y ser más exitosos que sus competidores (Alfiky y Weisskopf, 2021). La reproducción de *T. asperellum* es asexual, desarrolla hifas hialinas que se ramifican entre 5 a 10 minutos, su pared celular está compuesta principalmente por quitina y glucano, presenta tres tipos de propágulos, hifas, conidios y clamidosporas que pueden encontrarse en las partes terminales o intercalares de las hifas. Las clamidosporas son estructuras de resistencia y se forman en condiciones adversas para el desarrollo y supervivencia del hongo. Los conidióforos son ramificados con una o pocas fiálides en forma de botella, los conidios son redondos o semi redondos, miden menos de 5 µm de diámetro y presentan una coloración de verde intenso a casi gris (Samuels, Ismael, Bon, De Respinis y Petrini, 2010; Martínez, Infante y Reyes, 2013).

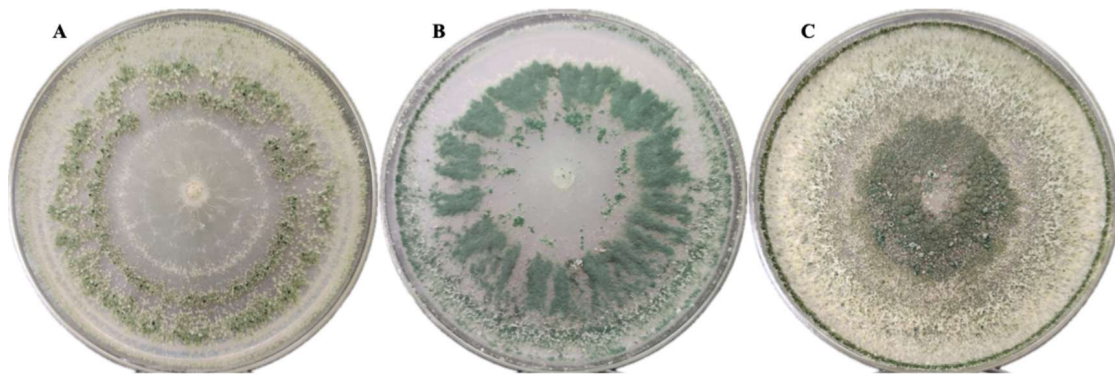


Figura 1. *Trichoderma asperellum* Ta13-17 con diez días de crecimiento en diferentes medios de cultivo.

A = agar jugo V8; B = papa dextrosa agar; C = agar extracto de malta.

Figure 1. *Trichoderma asperellum* Ta13-17 with ten days of growth in different culture media. A = v8 juice agar; B = potato dextrose agar; C = malt extract agar.

Principales mecanismos de acción de *Trichoderma*

El hongo *Trichoderma* presenta cuatro principales mecanismos de acción, competencia, micoparasitismo, antibiosis e inducción de resistencia sistémica (IRS). La competencia, generalmente es por espacio y nutrientes. *T. asperellum* presenta una tasa de crecimiento rápido, esto le da ventaja para ocupar el espacio y aprovechar los nutrientes disponibles con mayor velocidad que otros hongos del suelo. En medios como papa dextrosa agar (PDA), agar extracto de malta (AEM) y agar jugo V8 (AV8) ocupan la superficie de la caja en un tiempo entre 5 y 7 días. En la rizosfera la competencia es principalmente por nutrientes disponibles y asociación con las raíces de las plantas (Martínez *et al.*, 2013).

El micoparasitismo inicia con el reconocimiento del patógeno mediante la detección de metabolitos secretados por los hongos que estimulan el crecimiento quimiotrófico por parte de *T. asperellum*. Al establecer el contacto de las hifas entre el antagonista y el patógeno, se genera la adhesión y el enrollamiento por intervención de proteínas específicas como las lectinas para finalizar con la producción de enzimas como quitinasas, glucanasas, quitobionas y peroxidasas. Estas enzimas rompen las paredes celulares de los fitopatógenos y posibilitan la penetración del antagonista para alimentarse del contenido citoplasmático de sus células (Sood *et al.*, 2020).

La antibiosis, es la producción de enzimas o metabolitos de diferente naturaleza química con actividad citotóxica sobre el crecimiento de los patógenos. Los metabolitos biosintetizados por *T. asperellum* han sido clasificados en dos tipos principales, volátiles y no volátiles. El primer tipo se distingue por ser metabolitos de bajo peso molecular (100 a 500 daltons) y baja polaridad; los metabolitos no volátiles generalmente son de mayor peso molecular y de media o alta polaridad (Schulz-Bohm, Martín-Sánchez y Garbeva, 2017; López-Calva *et al.*, 2018; Mukhopadhyay y Kumar, 2020). Por ejemplo, está el grupo de los péptidos no ribosomales reportados en *T. asperellum* que presentan importancia económica y ecológica, sus principales funciones son antimicrobianas y citotóxicas. Los sideróforos fungen como quelantes de hierro, reducen este elemento a formas disponibles para las plantas. Los policétidos, son el grupo más amplio de metabolitos producidos por hongos, participan en la competencia y comunicación entre los microorganismos, presentan actividad antibiótica e insecticida. Los terpenos son productos naturales con gran abundancia en la tierra, en este grupo encontramos metabolitos con actividad antifúngica como trichodermina y viridina (Zeilinger, Gruber, Bansal y Mukherjee, 2016).

La IRS es un mecanismo de acción indirecta que mejora el sistema inmunológico inherente de las plantas al desencadenar una respuesta sistémica por la activación de diferentes genes, cuyo objetivo final es preparar a la planta ante el ataque de algún fitopatógeno. Este mecanismo es regulado por diferentes elicitors como las proteínas *Sm1* y *Epl1* que pertenecen a la familia de las cerato-plataninas. La activación de este mecanismo está relacionada con vías de señalización de fitohormonas como ácido salicílico, ácido jasmónico y etileno (Murali *et al.*, 2021; Tanaka y Kahmann, 2021).

Además de los mecanismos principales mencionados anteriormente, la especie *T. asperellum* estimula el crecimiento y el desarrollo de las plantas y se asocia con ellas de manera externa o endófitas sin generar daños. Produce fitohormonas como auxinas que participan en el desarrollo del sistema radical, giberelinas y ácidos orgánicos que intervienen en la modificación del pH del suelo. Además, favorece la solubilización de fosfatos y elementos como calcio (Ca), cobre (Cu) y zinc (Zn) que en su forma original no están disponibles para las plantas (Figura 2) (Mukherjee, Horwitz, Herrera, Schmoll y Kenerley, 2013). Participa en las respuestas transcriptómicas,

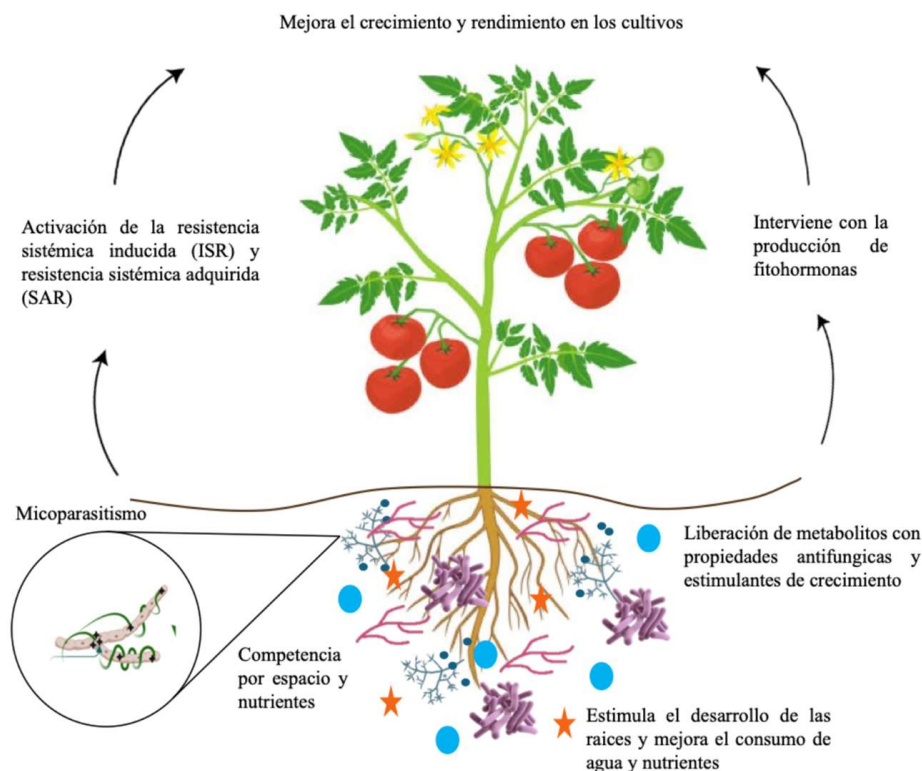


Figura 2. Principales mecanismos de acción de *Trichoderma asperellum* en la rizosfera y en las plantas.
Figure 2. Main mechanisms of action of *Trichoderma asperellum* in the rhizosphere and in plants.

proteómicas y metabolómicas en las plantas relacionadas con el aumento de azúcares, la tasa fotosintética, la transpiración, entre otras, que se reflejan en el crecimiento y la tolerancia contra factores bióticos y abióticos (Sharma y Sharma., 2020).

La efectividad de las especies de *Trichoderma* no se puede generalizar, ya que en muchos casos su capacidad antagonista o promotora del crecimiento vegetal se relaciona más con la cepa que con la propia especie; intervienen factores bióticos y abióticos que son responsables de desencadenar estos mecanismos (Cortés-Hernández, Alvarado y Sánchez, 2023).

Metabolitos volátiles reportados de *Trichoderma asperellum*

En los últimos diez años se encontraron 14 reportes donde evaluaron trece cepas de *T. asperellum* en las que detectaron un total de 622 metabolitos volátiles, en algunos se evaluó la actividad biológica contra hongos patógenos causantes de enfermedades en cultivos agrícolas (Cuadro 1). De las publicaciones encontradas tres son de China, seguido por India, Italia y Tailandia con dos cada país, Argelia, Egipto, Francia, Kazakstán y Uzbekistán con una contribución.

El metabolito 6-pentil- α -pirona (6-PP, sinónimos de 6PAP, 6-*n*-pentil-2H-piran-2-ona, 6-amil-alfa-pirona) (Figura 3A) se detectó en siete cepas (SC1, GDFS1009, TF1, IMI 393899, T1, 6S-2, SC2) de *T. asperellum* de las trece cepas evaluadas, con actividad contra fitopatógenos (Cuadro 1). El efecto antifúngico de la 6-pentil- α -pirona puede deberse a su capacidad para adsorberse dentro de las membranas celulares donde forma una capa hidrofóbica sobre la pared celular; esta actividad impide la absorción de agua por la célula del hongo fitopatógeno (Hao et al., 2023; Mendoza-Mendoza et al., 2024). Así mismo, se identificó la producción del alcohol feniletílico (Figura 3B), por las cepas IMI 393899, T76-14, Uz-A4, T4 y SC2; este metabolito puede afectar el crecimiento micelial y causar cambios anormales en el micelio de los hongos (Intana, Kheawleng y Sunpapao, 2021; Abdenaceur, Farida y Fatma, 2024).

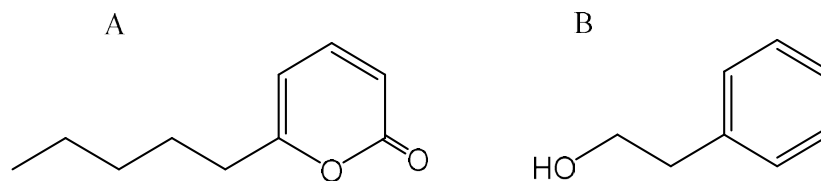


Figura 3. A: 6-pentil- α -pirona, B: alcohol feniletílico.
Figure 3. A: 6-pentyl- α -pyrone, B: phenylethyl alcohol.

Los principales medios de cultivo utilizados para el crecimiento de las diferentes cepas de *T. asperellum* son el caldo de papa dextrosa (CPD) y PDA. En particular, la cepa *T. asperellum* GDFS1009 se cultivó en tres medios diferentes, PDA, CPD, y en una mezcla líquida de extracto de levadura-melaza-harina de gluten de maíz (2:1:1%) (Wu *et al.*, 2017; Karuppiyah *et al.*, 2019). En este último medio, la cepa GDFS1009 se cultivó en agitación de forma individual y en co-cultivo con *Bacillus amyloliquefaciens*, al séptimo día se detectaron 68 y 42 metabolitos orgánicos volátiles, respectivamente. Los metabolitos mayoritarios en el cultivo individual correspondieron a 6-PP, en el co-cultivo se detectó 6-PP, α -cupreneno y 1,2-bencisotiazol-3(2H)-ona (Karuppiyah *et al.*, 2019). Estos resultados podrían sugerir que el crecimiento en interacción con otro microorganismo puede estimular la expresión de grupos de genes especializados en la producción de diferentes metabolitos (Pan, Bai, Chen, Zhang y Wang, 2019; Wang *et al.*, 2021a). La cepa de *T. asperellum* TF1 se cultivó en un medio sólido a base de una mezcla de sarmientos (*Vitis vinifera*), rastrojo de jatropha (*Jatropha* sp.), orujo de oliva (*Olea europaea*), harina de papa (*Solanum tuberosum*) y aceite de oliva en proporción 30-20-20-20-10% para la producción de 6-PP (Rayhane *et al.*, 2019).

El 50% de las cepas de *T. asperellum* evaluadas muestran actividad antifúngica de sus metabolitos volátiles contra hongos fitopatógenos de importancia agrícola principalmente de los géneros *Alternaria*, *Corynespora*, *Curvularia* y *Fusarium*. Las cepas de *T. asperellum* T76-14, 6S-2, TR-14, 1M F-RKM 0786 y SC2 se evaluaron contra *Fusarium* spp. (Cuadro 1). La cepa *T. asperellum* T76-14 inhibió el crecimiento micelial (ICM) de *F. incarnatum* (62.5%) en el ensayo por doble placa asociado a la producción de metabolitos volátiles (Intana *et al.*, 2021). Esta cepa emite 17 metabolitos volátiles donde se detectó el alcohol feniletílico como mayoritario (23.19%). La mezcla de estos metabolitos volátiles en contacto con frutos de melón ocasionó la reducción de 1 cm de las lesiones causadas por el fitopatógeno (Intana *et al.*, 2021). La cepa 6S-2 inhibió el crecimiento micelial de *F. proliferatum* f. sp. *malus domestica* MR5 en 53.50%. De esta cepa se detectaron 201 metabolitos volátiles, de los cuales 18 presentaron áreas superiores al 0.5%, siendo la 6-PP el mayoritario con 36.45% de abundancia (Wang *et al.*, 2021b). Asimismo, reportaron que el hongo produce sustancias como auxinas y sideróforos que estimulan el desarrollo de raíces laterales y el crecimiento en plantas de *Arabidopsis thaliana* que son expuestas a los metabolitos volátiles *in vitro* (Wang *et al.*, 2021b). Las cepas TR-14 y 1M F-RKM0786 inducen ICM del 72.22% y 28.6%, respectivamente, al ser evaluadas *in vitro* contra *F. oxysporum* (Sunkad, Joshi y Patil, 2023). Este fitopatógeno es catalogado como uno de los 10 más destructivos de cultivos agrícolas de importancia económica como la marchitez en solanáceas, gramíneas y otros cultivos (Dean *et al.*, 2012; Villa-Martínez *et al.*, 2014; Gómez *et al.* 2022). Los autores reportan 29 metabolitos volátiles de la cepa *T. asperellum* TR-14, detectando el 1-octen-3-ol con 26.1% de abundancia (Sunkad *et al.*, 2023). Siete metabolitos se identificaron tentativamente de la cepa 1M F-RKM, siendo los más abundantes el 1-octen-3-ol (26.1%) y el *o*-xileno (14.5%). Ambos compuestos son reportados en el género *Trichoderma* con actividad antifúngica *in vitro* contra *F. oxysporum* (ICM de 28.6%) y *A. alternata* (ICM de 66.7%) (Shemshura *et al.*, 2024).

La cepa *T. asperellum* SC2 se cultivó en CPD por siete días y se obtuvieron las fracciones de hexano, éter etílico, acetato de etilo y butanol del filtrado de cultivo y de la biomasa micelial. Entre estas ocho fracciones, la concentración mínima inhibitoria (CMI) se detectó en las fracciones de hexano, éter etílico y acetato de etilo del filtrado de cultivo contra *F. oxysporum*, *F. proliferatum*, *F. solani* y *F. verticillioides* (0.2 - 0.67 mg mL⁻¹) y las fracciones de éter etílico, acetato de etilo y butanol de la biomasa micelial con CMI de 0.2 - 0.87 mg mL⁻¹, utilizando la técnica de difusión en disco de papel. La fracción de éter etílico del filtrado de cultivo mostró las más bajas CMI de 0.2 - 0.42 mg mL⁻¹ contra *F. proliferatum*, *F. solani* y *F. verticillioides* y la fracción de butanol de la biomasa micelial con CMI de 0.33 mg mL⁻¹ contra *F. oxysporum*. Los análisis cromatográficos detectaron que las fracciones de hexano y éter etílico del filtrado activas contienen 6-PP en altas concentraciones del 43.22% - 93.93%; la fracción de acetato de etilo contiene ergosterol (31.79%); las fracciones de éter etílico, acetato de etilo y butanol del micelio mostraron la presencia de ácidos grasos principalmente y la hexánica 6-PP y un ftalato (Elshahawy y Marrez, 2024).

Cuadro 1. Metabolitos volátiles reportados de *Trichoderma asperellum* con aplicación agrícola (2014-2024).
Table 1. Reported volatile metabolites of *Trichoderma asperellum* with agricultural application (2014-2024).

Cepa	Medio de cultivo	Número metabolitos	Componentes mayoritarios Metabolito (%)	Patógeno (Inhibición)	País	Referencia
SC1	CPD	43	6-PP (66.63%)	Ne	India	Bhardwaj y Kumar, 2017
GDFS1009	PDA CPD	68 28	2,2,6,6-tetrametil-4-piperidinona 6-PP 2,6,10-trimetil-tetradecano 2,6,10-trimetil-pentadecano	Ne	China	Wu et al., 2017
GDFS1009	YMC líquido	68 (co-cultivo- <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>) 42 (monocultivo)	6-PP α -cupreneno 1,2-bencisotiazol-3(2H)-ona 6-PP	Ne	China	Karuppiah, Sun, Li, Vallikkannu, y Chen, 2019
TF1	Medio sólido*	1	6-PP	Ne	Francia	Rayhane et al., 2019
IMI 393899	CPD	62	alcohol feniletílico (19.06%) 6-PP (42.66%) α -zingibereno (5.86%) α -sesquifelandreno (6.60%)	Ne	Italia	Stracquandano, Quiles, Meca y Cacciola, 2020
T1	PDA	22	6-PP (14.20%) Succinato de etil-2-(2-chlorofenoxi)- (13.05%)	<i>Corynespora cassiicola</i> (ICM= 61.31%) <i>Curvularia aeria</i> (ICM= 41.46%) PCV en lechuga	Tailandia	Wonglom y Sunpapao, 2020
T76-14	PDA	17	3-metilpentano alcohol feniletílico (23.19%) β -curcumeno (8.49%)	<i>Fusarium incarnatum</i> (ICM=62.5%)	Tailandia	Intana, Kheawheng y Sunpapao, 2021
6S-2	CPD	201	6-PP (36.45%) 2-pentil-furano (6.43%)	<i>Fusarium proliferatum</i> f. sp. <i>malus domestica</i> MR5 (ICM= 53.50%) PCV en <i>Arabidopsis thaliana</i>	China	Wang et al., 2021 ^a
B6	PDA	20	2-pentil-furano	Ne	Italia	Gualtieri et al., 2022
Uz-A4	MN	11	alcohol feniletílico 5-hidroximetilfurfural 1-dodecanol 2,4-di- <i>terc</i> -butilfenol ácido hexadecanoico 2-metil-hexadecanol pentadecilonato de etilo ácido octadecanoico	Ne	Uzbekistán	Shavkiev et al., 2022

SC = sin clave; PDA = papa dextrosa agar; CPD = caldo de papa dextrosa; YMC = extracto de levadura, melaza y harina de gluten de maíz en agitación; MN = medio nutritivo; Ne = no evaluado; CMI = concentración mínima inhibitoria; IMC = inhibición de crecimiento micelial; PCV = promotor de crecimiento vegetal; MN (g L⁻¹) = KH₂PO₄ - 1.0; (NH₄)₂HPO₄ - 2.3; MgSO₄ - 0.5; CaCl₂ - 0.3; sacarosa - 20; (pH 5.5); * = mezcla de sarmientos, jatropha, orujo de aceituna, harina de papa y aceite de oliva (30:20:20:20, 10%); 6-PP = 6-pentil- α -pirona.

SC = no key; PDA = potato dextrose agar; CPD = potato dextrose broth; YMC = yeast extract, molasses and corn gluten meal under agitation; MN = nutrient medium; Ne = not evaluated; MIC = minimum inhibitory concentration; IMC = mycelial growth inhibition; PCV = plant growth promoter; MN (g L⁻¹) = KH₂PO₄ - 1.0; (NH₄)₂HPO₄ - 2.3; MgSO₄ - 0.5; CaCl₂ - 0.3; sucrose - 20; (pH 5.5); * = mixture of vine shoots, jatropha, olive pomace, potato flour and olive oil (30:20:20:20, 10%); 6-PP = 6-pentyl- α -pyrone.

Cuadro 1. Metabolitos volátiles reportados de *Trichoderma asperellum* con aplicación agrícola (2014-2024). Continuación.
Table 1. Reported volatile metabolites of *Trichoderma asperellum* with agricultural application (2014-2024). Continuation.

Cepa	Medio de cultivo	Número metabolitos	Componentes mayoritarios Metabolito (%)	Patógeno (Inhibición)	País	Referencia
SC2	CPD	27 (filtrado de cultivo) 21 (micelio)	Fracción hexánica: 6-PP (93.93 %) Fracción éter dietílico: 6-PP (43.22%) Fracción acetato de etilo: ergosterol (31.79 %) Fracción hexánica: 6-PP (34.69%) Fracción acetato de etilo: ácido hexadecanoico (26.55%) ácido oleico (11.79%) ácido linoleico (24.2%) Fracción éter dietílico: ácido linoleico (8.29%) 6-PP (5.94%) Ácido oleico (5.66%) Fracción de butanol: ácido hexadecanoico (25.6%) ácido oleico (14.68%) ácido linoleico (20.3%) 2-metil-2-pentanol-4-ona (14.62%)	<i>F. oxysporum</i> (CMI = 0.5 - 0.58 mg mL ⁻¹) <i>F. proliferatum</i> (CMI= 0.2 - 0.67 mg mL ⁻¹) <i>F. solani</i> (CMI = 0.42 - 0.83 mg mL ⁻¹) <i>F. verticilloides</i> (CMI= 0.82 - 1.08 mg mL ⁻¹) <i>F. oxysporum</i> (CMI = 0.33 - 0.87 mg mL ⁻¹) <i>F. proliferatum</i> (CMI= 0.58 - 0.68 mg mL ⁻¹) <i>F. solani</i> (CMI = 0.58 - 1.42 mg mL ⁻¹) <i>F. verticilloides</i> (CMI= 0.2 - 0.67 mg mL ⁻¹) y <i>F.</i> <i>proliferatum</i> (15.0 mm) por fracción de hexano	Egipto	Elshahawy y Marrez, 2024
TR-14	CPD	29	2-imidazol-1-metil-piridina 1-óxido	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>ciceris</i> (ICM= 72.22%)	India	Sunkad, Joshi y Patil, 2023
1M F-RKM 0786	PDA	7	1-octen-3-ol (26.1%) 2-etil-hexanol (12.2%) 3-heptanona 6-metil-1-octen-3-ol nonanal 2-etil-nonanol	<i>Fusarium oxysporum</i> (ICM= 28.6%) y <i>A.</i> <i>alternata</i> (ICM= 66.7%)	Kazakhstan	Shemshura et al., 2024
T4	CPD	15	Fracción hexánica: octadecano (29.6%) propionato de etil-2-(2- chloroacetamido)-3,3,3-trifluoro- 2-(3-fluoroanilino) (22.4%)	<i>Verticillium dahliae</i> cepas Vd1, Vd2, Vd3, Vd4 y Vd5 (ICM= 60.45% - 64.87%)	Algeria	Abdenaceur, Farida y Fatma, 2024

SC = sin clave; PDA = papa dextrosa agar; CPD = caldo de papa dextrosa; YMC = extracto de levadura, melaza y harina de gluten de maíz en agitación; MN = medio nutritivo; Ne = no evaluado; CMI = concentración mínima inhibitoria; IMC = inhibición de crecimiento micelial; PCV = promotor de crecimiento vegetal; MN (g L⁻¹) = KH₂PO₄ - 1.0; (NH₄)₂HPO₄ - 2.3; MgSO₄ - 0.5; CaCl₂ - 0.3; sacarosa - 20; (pH 5.5); * = mezcla de sarmientos, jatropha, orujo de aceituna, harina de papa y aceite de oliva (30:20:20:20, 10%); 6-PP = 6-pentil- α -pirona.

SC = no key; PDA = potato dextrose agar; CPD = potato dextrose broth; YMC = yeast extract, molasses and corn gluten meal under agitation; MN = nutrient medium; Ne = not evaluated; MIC = minimum inhibitory concentration; IMC = mycelial growth inhibition; PCV = plant growth promoter; MN (g L⁻¹) = KH₂PO₄ - 1.0; (NH₄)₂HPO₄ - 2.3; MgSO₄ - 0.5; CaCl₂ - 0.3; sucrose - 20; (pH 5.5); * = mixture of vine shoots, jatropha, olive pomace, potato flour and olive oil (30:20:20:20, 10%); 6-PP = 6-pentyl- α -pyrone.

Por otra parte, la exposición de plántulas de lechuga a los metabolitos volátiles producidos por la cepa *T. asperellum* T1 estimularon la producción de biomasa, estos influyeron en el desarrollo de raíces con promedio de 6.2 ± 1.3 , aumentaron el promedio a 4.4 ± 0.5 el número de hojas y el contenido total de clorofilas fue significativamente mayor en comparación con las plantas testigo (Wonglom y Sunpapao, 2020). Un total de 22 metabolitos volátiles del tipo de ácidos orgánicos, ácidos grasos, alcanos, alcoholes, aldehídos y piranos se identificaron de la cepa T1. Esta mezcla afectó el crecimiento de *Corynespora cassiicola* y *Curvularia aeria* con ICM de 61.31% y 41.46% respectivamente. Ambos fitopatógenos son agentes causales de la mancha foliar en plantas de lechuga (Wonglom y Sunpapao, 2020).

Metabolitos no volátiles reportados de *Trichoderma asperellum*

Los reportes de metabolitos no volátiles (80) detectados de *T. asperellum* incluyen diez cepas, de las cuales se evaluaron sus extractos o metabolitos contra hongos fitopatógenos en su mayoría causantes de enfermedades en cultivos agrícolas (Cuadro 2), las cepas *T. asperellum* GDFS1009 y la *T. asperellum* IMI 393899 también tienen reportes de sus metabolitos volátiles. El 80% de las cepas son nativas del continente asiático (F009, GDFS1009, IRAN 3062C, sp. 15, P1, YNQJ1002, D7), una de Europa (IMI 393899) y una (SC3) tiene origen en América.

El principal medio de cultivo usado para el crecimiento de las cepas reportadas es el caldo de papa dextrosa, con el cual se cultivaron las cepas *T. asperellum* F009, IMI 393899, P1, YNQJ1002, D7, con tiempo de cultivo entre 7 y 27 días (Cuadro 2). Entre estas cepas, del extracto de acetato de etilo de *T. asperellum* F009 se aisló e identificó el metabolito trichodermaerina, una lactona diterpénica, la cual mostró ICM del 76.5% de *Colletotrichum gloeosporioides* a 200 mg L^{-1} (Chantrapromma, Jeerapong, Phupong, Quah y Fun, 2014). Mientras que del extracto de acetato de etilo de IMI 393899 se detectó trichodermaerina junto con 6-PP, los peptabioles asperelina A, E y H, alcaloides y terpenos. El extracto de acetato de etilo de la cepa IMI 393899 mostró mayor efectividad antifúngica con CMI de $0.09 - 0.19 \text{ mg mL}^{-1}$ contra *Aspergillus steynii*, *Penicillium brevicopactum*, *P. commune*, *P. digitatum*, *P. expansum*, *P. roqueforti*, *Fusarium sporotrichoides*, *Penicillium camemberti* y *Phytophthora nicotianae*, y CMI de $0.39 - 0.78 \text{ mg mL}^{-1}$ contra *Aspergillus carbonarius*, *A. flavus*, *A. laticoffeatus*, *A. niger*, *A. parasiticus*, *Neofusicoccum batangarum*, *Colletotrichum acutatum*, *C. gloeosporioides*, *F. graminearum*, *F. langsethiae*, *F. poae*, *F. proliferatum*, *Phytophthora parvispora*, *P. verrucosum*, *F. verticillioides* y *N. parvum* (Stracquadanio et al., 2020). Recientemente, trichodermaerina se detectó del extracto de acetato de etilo de la mutante TraM05 de *T. asperellum* cultivada en CPD, cuya subfracción 5Fr mostró una ICM de 84.53% contra *F. oxysporum* f. sp. *ciceri* a $400 \mu\text{g mL}^{-1}$ (Birari, Ingle, Mane y Bramhankar, 2025).

Por otra parte, del extracto clorofórmico de la cepa *T. asperellum* YNQJ1002 se detectaron doce metabolitos tentativamente identificados como trigonósido Xb, 5-hidroxiindoleacetaldehído, everolimus, ácido *trans*-hepta-2, 4, 6-trienoico, 2-Al, torvósido A, trigofoenósido B, 6-metoxiquinolona, (R)-ar-turmerona, frangulanina, torvósido G y camazuleno. El filtrado de cultivo de *T. asperellum* YNQJ1002 en medio en agar (5:10, v/v) inhibió el 46% del crecimiento micelial de *F. graminearum* (Ji et al., 2023). La 6-PP se reportó del extracto clorofórmico de *T. asperellum* P1 mostrando actividad contra *Magnaportheopsis maydis* a 8 mg mL^{-1} (Degani, Khatib, Becher, Gordani y Harris, 2021). Del extracto de acetato de etilo de la cepa *T. asperellum* D7, endófito de raíces de una orquídea del género *Dendrobium*, se obtuvieron siete fracciones. Entre estas, la fracción 4 mostró mayor efectividad (ICM de 50.62%) *in vitro* contra *Ganoderma boninense* a 10 mg mL^{-1} . La fracción 4 contiene 35 metabolitos, los mayoritarios (>5%) de ellos identificados por cromatografía de líquidos acoplada a espectrometría de masas fueron esfalerosida A, hexanetioato de S-metilo y 7,8-dihidrovomifoliol 9-[ramnosil-(1- > 6)-glucósido] (Chua, Song, y Ting, 2024).

Las cepas *T. asperellum* GDFS1009 y *T. asperellum* IRAN 3062C se cultivaron en medios diferentes, con la primera se usó un medio peptídico antimicrobiano con diferentes sales y glucosa al 0.5% como fuente de carbono (Wu et al., 2017); la segunda se cultivó en un medio de agar extracto de levadura y glucosa (10 g L^{-1} glucosa, $10 \text{ g L}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$, 5 g L^{-1} extracto de levadura y 20 g L^{-1} de agar) (Tamandegani et al., 2020). Para el cultivo de *T. asperellum* SC3 proveniente de Costa Rica, se probaron diferentes factores en medios de cultivo, como la fuente de carbono, adición de micelio liofilizado de diferentes fitopatógenos y la adición de aminoácidos (Alfaro-Vargas et al., 2022). Por otra parte, se evaluaron dos nuevos metabolitos biosintetizados por la cepa SCNU-F0048 aunque estos no fueron efectivos para el control de *C. gloeosporioides* y *F. oxysporum* f. sp. presentaron valores de CMI = $0.016 \mu\text{M}$ y CMI = $0.022 \mu\text{M}$ contra *Penicillium italicum* (Chen et al., 2024).

Cuadro 2. Metabolitos no volátiles reportados de cepas *Trichoderma asperellum* (2014-2024).
Table 2. Non-volatile metabolites reported from *Trichoderma asperellum* strains (2014-2024).

Clave de cepa	Medio de cultivo	Extracto: metabolitos	Actividad biológica	País	Referencia
F009	CPD	Acetato de etilo: trichodermaerina	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i> (ICM = 76.5% a 200 mg L ⁻¹)	Tailandia	Chantrapromma, Jeerapong, Phupong, Quah y Fun, 2014
GDFS1009	MPA	Butanol: TBV Trichotoxina A-50F Hipomurocina B-I hipomurocina B-II hipomurocina B-IIIa trichotoxina A-50-I	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cucumerinum</i> (ICM = 76.28%) <i>F. graminearum</i> (ICM = 100%)	China	Wu et al., 2017
IRAN 3062C	AEMLG	Cloroformo: trichotoxina T5D2 trichotoxina A-50 E trichotoxina A-50 F trichotoxina A-50 I	<i>Fusarium culmorum</i> <i>F. moniliforme</i> <i>F. oxysporum</i> <i>F. graminearum</i> , <i>Rhizoctonia solani</i> <i>Alternaria solani</i> (CMI= 100 µg mL ⁻¹)	Irán	Tamandegani et al., 2020
IMI 393899	CPD	Acetato de etilo: trichodermaerina asperelina H asperelina A asperelina E metilcordisinina A 3,5,9-trihidroxyergosta-7 ergosta-7,22-dien-3-ol β-sitosterol atrichodermona B atrichodermona C 6-pent-1-enil-piran-2-ona	<i>Aspergillus steynii</i> <i>Penicillium brevicopactum</i> <i>P. commune</i> <i>P. digitatum</i> <i>P. expansum</i> <i>P. roqueforti</i> (CMI= 0.09 mg mL ⁻¹) <i>Fusarium sporotrichoides</i> <i>Penicillium camemberti</i> <i>Phytophthora nicotianae</i> (CMI= 0.19 mg mL ⁻¹) <i>Aspergillus carbonarius</i> <i>A. flavus</i> <i>A. lacticoffeatus</i> <i>A. niger</i> <i>A. parasiticus</i> <i>Neofusicoccum batangarum</i> <i>Colletotrichum acutatum</i> <i>C. gloeosporioides</i> <i>F. graminearum</i> <i>F. langsethiae</i> <i>F. poae</i> <i>F. proliferatum</i> <i>Phytophthora parvispora</i> <i>P. verrucosum</i> (CMI= 0.39 mg mL ⁻¹) <i>F. verticillioides</i> <i>N. parvum</i> (CMI= 0.78 V)	Italia	Stracquadanio et al., 2020

SC = sin clave; PDA = papa dextrosa agar; CPD = caldo de papa dextrosa; MPA = medio peptídico antimicrobiano; AEMLG = agar extracto de levadura y glucosa; FC = filtrado de cultivo; FO = fracción orgánica; CMI = concentración mínima inhibitoria; ICM = inhibición de crecimiento micelial; * = 0.5% glucosa; 0.08% KH₂PO₄; 0.07% KNO₃; 0.02% Ca(H₂PO₄)₂; 0.05% MgSO₄·7H₂O; 0.001% MnSO₄·5H₂O; 0.0005% CuSO₄·5H₂O; 0.0001% FeSO₄·7H₂O.
 SC = no key; PDA = potato dextrose agar; CPD = potato dextrose broth; MPA = antimicrobial peptide medium; AEMLG = yeast extract glucose agar; FC = culture filtrate; FO = organic fraction; CMI = minimum inhibitory concentration; ICM = inhibition of mycelial growth; * = 0.5% glucose; 0.08% KH₂PO₄; 0.07% KNO₃; 0.02% Ca(H₂PO₄)₂; 0.05% MgSO₄·7H₂O; 0.001% MnSO₄·5H₂O; 0.0005% CuSO₄·5H₂O; 0.0001% FeSO₄·7H₂O.

Cuadro 2. Metabolitos no volátiles reportados de cepas *Trichoderma asperellum* (2014-2024). Continuación.
Table 2. Non-volatile metabolites reported from *Trichoderma asperellum* strains (2014-2024). Continuation.

Clave de cepa	Medio de cultivo	Extracto: metabolitos	Actividad biológica	País	Referencia
sp. 15	Murashige y Skoog	Metanol: ácido cítrico	<i>F. oxysporum</i> (ICM= 9 cm) concentración =75%, 91% de incremento de la germinación en semillas de tomate	Arabia Saudita	Al-askar, Saber, Ghoneem, Hafez e Ibrahim, 2021
P1	CPD	Cloroformo: 6-pentil- α -pirona	<i>Magnaporthiopsis maydis</i> (CMI= 8 mg mL ⁻¹)	Israel	Degani, Khatib, Becher, Gordani y Harris, 2021.
SC3	Fermentaciones optimizadas con variación de factores (OSMAC)	Etanol: trichotoxina T5D2 trichotoxina 1690 trichotoxina 1703A trichotoxina A-40 trichotoxina 1717A trichotoxina A-50 G	Acetato de etilo: <i>C. gloeosporoides</i> (ICM= 92.2%) <i>Botrytis cinerea</i> (74.29%) <i>A. alternata</i> (58.4%) <i>F. oxysporum</i> (36.2%) (800 μ g mL ⁻¹)	Costa Rica	Alfaro-Vargas et al., 2022
YNQJ1002	CPD	Cloroformo: trigonósido Xb 5-hidroxi-indoleacetaldehído everolimus ácido trans-hepta-2, 4, 6-trienoico torvósido G trigofenósido B 6-metoxiquinolina (R)-ar-turmerona frangulanina camazuleno	<i>F. graminearum</i> (ICM= 46% con 5 mL del filtrado de cultivo + 10 mL PDA)	China	Ji et al., 2023
SCNUF0048	Cultivo en arroz y agua salina al 0.3%	Acetato de etilo: ergosta-4,6,8 (14),22-tetraen-3-(3'-metil-4'-hidroxil- γ -butenólido) campesterol B estigmasta-4,6,8(14),22-tetraen-3-one 4-hidroxi-17- metilincisterol	<i>Penicillium italicum</i> Ergosta-4,6,8(14),22-tetraen-3-(3'-metil-4'-hidroxil- γ -butenolida) (CMI = 0.016) Campesterol B(CMI = 0.022)	China	Chen et al., 2024
D7	CPD	Acetato de etilo: Fracción 4: sphallerosida A 7,8-dihidrovomifoliol 9-[ramnosil-(1- > 6)-glucósido]-hexanetioato de S-metilo	Fracción 4: <i>Ganoderma boninense</i> (ICM= 50.62%; CMI= 10 mg mL ⁻¹)	Eslovaquia	Chua, Song y Ting, 2024

SC = sin clave; PDA = papa dextrosa agar; CPD = caldo de papa dextrosa; MPA = medio peptídico antimicrobiano; AEMLG = agar extracto de levadura y glucosa; FC = filtrado de cultivo; FO = fracción orgánica; CMI = concentración mínima inhibitoria; ICM = inhibición de crecimiento micelial; * = 0.5% glucosa; 0.08% KH₂PO₄; 0.07% KNO₃; 0.02% Ca(H₂PO₄)₂; 0.05% MgSO₄·7H₂O; 0.001% MnSO₄·5H₂O; 0.0005% CuSO₄·5H₂O; 0.0001% FeSO₄·7H₂O.
 SC = no key; PDA = potato dextrose agar; CPD = potato dextrose broth; MPA = antimicrobial peptide medium; AEMLG = yeast extract glucose agar; FC = culture filtrate; FO = organic fraction; CMI = minimum inhibitory concentration; ICM = inhibition of mycelial growth; * = 0.5% glucose; 0.08% KH₂PO₄; 0.07% KNO₃; 0.02% Ca(H₂PO₄)₂; 0.05% MgSO₄·7H₂O; 0.001% MnSO₄·5H₂O; 0.0005% CuSO₄·5H₂O; 0.0001% FeSO₄·7H₂O.

Las cepas *T. asperellum* GDFS1009, IRAN 3062C y SC3 producen diferentes trichotoxinas del grupo de los peptaiboles con actividad antifúngica de los extractos evaluados en especies de fitopatógenos del género *Fusarium*. La primera biosintetiza los peptaiboles TBV, trichotoxina A 50-F, trichotoxina A-50-I, hipomurocina B-I, hipomurocina B-II, e hipomurocina B-IIIa detectados en el extracto crudo de butanol que presentó una ICM de 76.28% y 100% contra *F. oxysporum* f. sp. *cucumerin* y *F. graminearum*, respectivamente (Wu *et al.*, 2017). La trichotoxina T5D2 se reporta en las cepas *T. asperellum* IRAN3062C y SC3 (Tamandegani *et al.*, 2020; Alfaro-Vargas *et al.*, 2022). Otras 27 trichotoxinas se detectaron en el extracto de cloroformo de la primera cepa, la cual muestra CMI de 100 $\mu\text{g mL}^{-1}$ contra *Alternaria solani*, *Fusarium ciformum*, *F. graminearum*, *F. moniliforme*, *F. oxysporum* y *Rhizoctonia solani*. Mientras que del extracto etanólico de *T. asperellum* SC3 se detectaron otros cinco peptaiboles que incluyen a la trichotoxina 1690, 1703A, A-40, 1717A y A-50 G con ICM de 36.2%- 92.2% a 800 $\mu\text{g mL}^{-1}$ (Alfaro-Vargas *et al.*, 2022). La acción de las toxinas biosintetizadas por *T. asperellum* se basa principalmente en la inhibición de la germinación de las esporas y la elongación de hifas de los hongos fitopatógenos (Cruz, Rivero, Martínez, Echevarría y Rodríguez, 2017; Zin y Badaluddin, 2020).

La mayoría de los reportes de *T. asperellum* con actividad antifúngica son contra especies del género *Fusarium*, destaca la cepa sp. 15 esta se cultivó en el medio Murashige y Skoog para la producción de ácido cítrico (Al-askar, Saber, Ghoneem, Hafez e Ibrahim, 2021). El extracto crudo a partir de una concentración del 75% inhibió al 100% el crecimiento micelial de *F. oxysporum* y estimuló 91% la germinación de semillas de tomate, lo cual mejora el crecimiento en plántulas aumentando el vigor y la adaptación al momento del trasplante (Al-askar *et al.*, 2021).

En algunas contribuciones se evaluó la eficacia antifúngica de los filtrados contra hongos fitopatógenos, pero no se reporta la identificación de los metabolitos secretados por *T. asperellum*. Entre estos, los extractos de *T. asperellum* cepas Ta.1, Ta.12, Ta.25 y Ta.85 se evaluaron contra *Alternaria solani*. La cepa Ta. 85 fue la más sobresaliente al inhibir en 73% el crecimiento del patógeno por la secreción de metabolitos volátiles a las 24 horas y 68% de inhibición con los metabolitos no volátiles a las 72 horas, detectando la presencia de granulación, lisis y vacuolización del contenido citoplasmático celular en el micelio de los patógenos (Ronnie-Gakegne y Martínez-Coca, 2018). El filtrado de la cepa *T. asperellum* (SC) crecida en un medio líquido de agua de coco, agua de arroz y azúcar se evaluó para el control de la marchitez en banano causada por *Fusarium* sp., se observó un efecto positivo en la reducción de incidencia y severidad de la enfermedad en las plantas tratadas con el filtrado en comparación con las plantas testigo (Alfizar *et al.*, 2023).

Patentes con *Trichoderma asperellum*

El uso de *Trichoderma* como agente antagonista en la agricultura es una de las estrategias de control biológico aplicadas en varios países. Entre el 50 y el 60% del mercado global de productos de control biológico se basa en formulaciones de diferentes especies de este género, principalmente a base de sus esporas (Verma, Brar, Tyagi, Surampalli y Valero, 2007; Guzmán-Guzmán *et al.*, 2023). Las especies de *Trichoderma* más utilizadas en biocontrol de fitopatógenos corresponden a *T. asperellum*, *T. harzianum* y *T. atroviride*. Estas especies son utilizadas de forma individual o en mezclas para potenciar su efecto debido a la variación en el mecanismo de acción de cada cepa que le otorgan la efectividad como biofertilizantes y biocontroladores de microorganismos (Al-askar *et al.*, 2021; Guzmán-Guzmán *et al.*, 2023).

A nivel internacional en la plataforma Clarivate (2024) se detectaron 250 resultados en el Índice de Innovaciones de Derwent sobre la especie *T. asperellum*. El 2.8% de las patentes registradas en la plataforma están relacionadas con el uso individual de *T. asperellum* para la producción de metabolitos con fines agrícolas. También se registraron solicitudes de protección del proceso de elaboración de biofertilizantes o la aplicación de la especie *T. asperellum* que estimulan el crecimiento de las plantas, reducen el estrés y protegen a la plántula contra enfermedades causadas por *Colletotrichum gloeosporioides*, *Phytophthora plurivora* y *Fusarium* spp. (Shang *et al.*, 2019; Shu *et al.*, 2022). Otras de las patentes registradas incluyen el cultivo de *T. asperellum* HTTA-Z0002 en medio líquido de *m*-fenilendiamina (MPDA) para el control de enfermedades como el tizón temprano, el moho gris del tomate, el tizón tardío de la papa, la roya de la soja y el biocontrol de patógenos como *Fusarium* spp., *Botrytis cinerea*, *Verticillium dahliae*, *Phytophthora capsici*, entre otros (Chen, Yuan y Huang, 2020).

Entre las innovaciones se encuentra también la aplicación de *T. asperellum* para remediar suelos contaminados con arsénico y reducir la acumulación de este elemento en cultivos agrícolas; la descripción de un método para la obtención de etanol a partir del cultivo de *T. asperellum* y otras del área médica y sanitaria enfocadas en métodos de preparación de bactericidas y desinfectantes a partir de *T. asperellum* LB-N2 contra *Escherichia coli*, *salmonella* y *Staphylococcus aureus* (Xi *et al.*, 2016).

En el Cuadro 3 se enlistan siete patentes internacionales sobre el uso de *T. asperellum* con fines agrícolas, conteniendo *T. asperellum* por su producción de enzimas y ácidos orgánicos. Una de las patentes se basa en el co-cultivo de *T. asperellum* con *Bacillus subtilis* para la obtención de ácido undecilénico como tratamiento contra *Phytophthora* (Zhang et al., 2024). La cepa *T. asperellum* TZ312 cultivada en semillas de trigo para obtención de un metabolito volátil cuya aplicación inhibe la aparición de enfermedades de postcosecha y para la elaboración de fumigantes biológicos que inhiben la marchitez por *Fusarium* del banano (Huang, Mo, Li, Guo y Tang, 2022). Por otra parte, la cepa *T. asperellum* N-8-2 produce diferentes metabolitos con actividad inhibidora contra los patógenos *Colletotrichum gloeosporioides*, *Alternaria brassicae*, *Epicoccum sorghinum*, *Fusarium oxysporum*, *Gibberella moniliformis*, *Pestalotiopsis camelliae* y *Botryosphaeria dothidea* (Li et al., 2022). La cepa F-1087 produce enzimas hidrolíticas y péptidos con actividad contra las bacterias *B. subtilis*, *Mycobacterium sepedonicum*, *Pseudomonas syringae*, los hongos *Aspergillus niger* y *F. oxysporum* (Tukhbatova, Alimova, Zalyalyutdinova y Bikmullin, 2019). De forma similar con la producción de enzimas hidrolíticas, la cepa F-1395 es efectiva contra *A. niger* y *F. oxysporum* (Alimova, Ibatullina y Timerbulatova, 2021). La cepa *T. asperellum* 6S-2 produce enzimas y ácido-3-indolacético, el cual estimula el crecimiento de los cultivos a la par que tiene efecto contra *Alternaria alternata*, *Aspergillus flavus*, *Fusarium* spp., *Myrothecium verrucaria*, *Penicillium brasilianum*, *Pythium aphanidermatum*, *Phytophthora cactorum* y *Rhizoctonia solani* (Yin et al., 2021). De forma similar, *T. asperellum* GDFS1009 aumenta la producción de ácido giberélico en las plantas y estimula su crecimiento (Fu et al., 2023).

Cuadro 3. Patentes internacionales con aplicaciones en el área agrícola de *Trichoderma asperellum*.
Table 3. International patents with applications in the agricultural area of *Trichoderma asperellum*.

Clave de cepa/Producto	Aplicación	País	Referencia
TZ312/ 2,6,10,14-tetrametilheptadecano, β-curcumina y terc-butil p-cresol	Antifúngico: <i>Fusarium</i> spp. y <i>Botrytis cinerea</i>	China	Huang, Mo, Li, Guo y Tang, 2022
F-1087 /enzimas hidrolíticas y péptidos	Antibacterial: <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Mycobacterium sepedonicum</i> , <i>Pseudomonas syringae</i> antifúngico: <i>Aspergillus niger</i> , <i>Fusarium oxysporum</i>	Rusia	Tukhbatova, Alimova, Zalyalyutdinova y Bikmullin, 2019
F-1395/enzimas hidrolíticas	Antifúngico: <i>Aspergillus niger</i> y <i>Fusarium oxysporum</i>	Rusia	Alimova, Ibatullina y Timerbulatova, 2021
6S-2 /proteasas, celulasas, lacasas, amilasas y ácido indol-3-acético	Antifúngico: <i>Fusarium</i> spp., <i>Phytophthora cactorum</i> , <i>Pythium aphanidermatum</i> , <i>Alternaria alternata</i> , <i>Myrothecium verrucaria</i> , <i>Penicillium brasilianum</i> , <i>Rhizoctonia solani</i> y <i>A. flavus</i> sintetiza fósforo y estimula el crecimiento en cultivos.	China	Yin et al., 2021
N-8-2/6-pentil-2H-piran-3-ona, 2,4-di-terc-butilfenol, 2,2,4-trimetil-3-carboxiisopropanol, ácido valérico de éster isobutilico, 1,4-diclorobenceno, 2,6-dimetil-6-(4-metil-3-pentil)biciclo[3.1.1]hepta-2-eno y 2,4-di-terc-butilfenol	Antifúngico: <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> , <i>Alternaria brassicae</i> , <i>Epicoccum sorghinum</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Gibberella moniliformis</i> , <i>Pestalotiopsis camelliae</i> y <i>Botryosphaeria dothidea</i>	China	Li et al., 2022
GDSF1009/biofertilizante	Incrementa el rendimiento de ácido giberélico.	China	Fu et al., 2023
SC4/ Ácido undecilénico	Antifúngico contra <i>Phytophthora</i> spp.	China	Zhang et al., 2024

SC = sin clave.
SC = no code.

En el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI, 2025), se han depositado un total de 188 registros de patentes sobre métodos de elaboración de productos a base de *Trichoderma* spp. Entre los registros detectados se encuentra *T. asperellum* HSPT9B-2 mezclada con *A. niger* (HSP-10) que solubiliza el fosfato para aplicar en gramíneas tropicales (Almendra, Pérez, Campos y Trejo, 2019). Se encuentra también la formulación de un producto que tiene como principal ingrediente *T. asperellum* 321 para el control de enfermedades foliares y radiculares causadas por hongos fitopatógenos en plantas y como inoculante biológico en semillas para mejorar el rendimiento en los cultivos (Del Castillo, Arroyo, Avila y Soto, 2023). En otra patente, se reporta la elaboración de biofungicidas a partir del cultivo de *T. asperellum* cepas CERI 4134 y CERI-4175 mediante propágulos de microesclerocios aplicados para el control de *Moniliophthora roreri*, agente causal de la moniliasis del cacao (Martínez, Martínez y Avendaño, 2024). El co-cultivo de microorganismos con capacidad antifúngica y promotora del crecimiento vegetal, *Bacillus subtilis* cepa Bk-Bs-01, *Pseudomonas fluorescens* cepa Bk-Pf-01, *T. asperellum* cepa Bk-Ta-01, enriquecidos con macro y micro nutrientes que incluyen protección a las raíces de plántulas de maíz y biocontrol contra fitopatógenos como *Fusarium* sp., *Alternaria* sp., *Rhizoctonia* sp., *Pythium* sp. y *Puccinia* sp. así como de las bacterias *Erwinia* sp., *Xanthomonas* sp., *Pantoea* sp., *Pseudomonas syringae* y *Burkholderia* sp. (Velasco y Vicente, 2024).

En años recientes se han sumado más empresas en la elaboración y comercialización de productos para el control biológico. En México, están registrados 29 laboratorios que se dedican a la reproducción y comercialización de *Trichoderma* como agentes de control biológico. Entre estos los laboratorios Analógicos Tacana S.A. de C.V. del estado de Chiapas y Grupo Solena S.A.P.I. de C.V. del estado de Guanajuato reportan a *T. asperellum* en su lista de agentes comercializados. La mayoría de los productos a base de *Trichoderma* son preparados de esporas en forma de polvos o líquidos (Allende-Molar, Báez, Salazar y Rojo, 2022; Guzmán-Guzmán et al., 2023).

CONCLUSIONES

Entre las 14 cepas de *T. asperellum* reportadas con aplicaciones agrícolas, el 88.6% de los metabolitos detectados son de naturaleza volátil, siendo la 6-pentil- α -pirona las más frecuente, con alta abundancia en las cepas productoras. Entre los metabolitos no volátiles se detectaron recurrentemente los peptabioles. Los metabolitos, extractos o fracciones del 50% de las cepas de *T. asperellum* en estudio mostraron efectividad contra fitopatógenos del género *Fusarium*, catalogados como altamente dañinos en los cultivos agrícolas. Las contribuciones con *T. asperellum* se han realizado principalmente con cepas de Asia y Europa. Las patentes protegen especialmente mezclas de esporas de *Trichoderma* spp. o sus extractos en conjunto con las enzimas que producen, con usos diversos. La identificación de los principios activos de las cepas de *T. asperellum* con mayor potencial de uso agrícola es fundamental como medida de control de los formulados. Los metabolitos secretados por *T. asperellum* son una alternativa para la elaboración de productos eco-amigables para el control de agentes fitopatógenos causantes de enfermedades fúngicas en los cultivos agrícolas.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Todos los datos generados o analizados durante este estudio se incluyen en este artículo publicado.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Se agradece a la Secretaría de Ciencia y Tecnología SECIHTI la beca posdoctoral No. 766877 otorgada a Sandy Esther Celis-Perera.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: S.E.C.P., J.C.A. y M.G.A.; Metodología: S.E.C.P.; Validación: M.G.A. y J.C.A.; Análisis formal: S.E.C.P. y L.M.B.; Escritura – preparación del borrador original: S.E.C.P.; Escritura – revisión y edición: M.G.A. y J.C.A.; Supervisión: L.M.B. y M.G.A.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal técnico de la biblioteca del CICY, Miriam Juan Qui, Sergio Pérez y Narcedalia Gamboa Angulo, por su apoyo en la búsqueda y adquisición de las referencias bibliográficas.

LITERATURA CITADA

- Abdenaceur, R., Farida, B. T., & Fatma, S. H. (2024). Volatile organic compounds activities of *Trichoderma* species isolated from olive grove soil against the wilt pathogen, *Verticillium dahliae*. *European Journal of Plant Pathology*, 170, 789-803. <https://doi.org/10.1007/s10658-024-02839-8>
- Alimova, F. K., Ibatullina, R. P., & Timerbulatova, L. M. (2021). *Trichoderma asperellum* F-1395 strain – producer of hydrolytic complex (Russian Federation Patent No. RU2740318C1). <https://patents.google.com/patent/RU2740318C1>
- Al-Askar, A. A., Saber, W. I., Ghoneem, K. M., Hafez, E. E., & Ibrahim, A. A. (2021). Crude citric acid of *Trichoderma asperellum*: Tomato growth promoter and suppressor of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Plants*, 10(2), 1-19. <https://doi.org/10.3390/plants10020222>
- Alfaro-Vargas, P., Bastos-Salas, A., Muñoz-Arrieta, R., Pereira-Reyes, R., Redondo-Solano, M., Fernández, J., ... & López-Gómez, J. P. (2022). Peptaibol production and characterization from *Trichoderma asperellum* and their action as biofungicide. *Journal of Fungi*, 8(10), 1-21. <https://doi.org/10.3390/jof8101037>
- Alfiky, A., & Weisskopf, L. (2021). Deciphering *Trichoderma*-plant-pathogen interactions for better development of biocontrol applications. *Journal of Fungi*, 7(1), 1-18. <https://doi.org/10.3390/jof7010061>
- Alfizar, A. A., Resdiar, A., Putra, I., Bustamam, H., Bessania, M. A., & Syaukani, S. (2023). Efficacy of *Trichoderma asperellum* and *Pseudomonas aeruginosa* metabolites against *Fusarium* wilt in bananas. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 18(6), 1525-1532. <https://doi.org/10.18280/ijdne.180628>
- Allende-Molar, R., Báez-Parra, K. M., Salazar-Villa, E., & Rojo-Báez, I. (2022). Biodiversity of *Trichoderma* spp. in Mexico and its potential use in agriculture. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25, 1-23. <https://doi.org/10.56369/tsaes.4297>
- Almendarez-Hernández, M. A. (2018). Determinantes de las patentes y otras formas de propiedad intelectual de los estados mexicanos. *Economía, Sociedad y Territorio*, 18(58), 657-695. <https://doi.org/10.22136/est20181223>
- Almendra, D. C., Pérez, H. J., Campos, R. M., & Trejo, E. S. (2019). Proceso de producción y uso de dos cepas de hongos solubilizadores de fosfatos para su aplicación en sistemas agrícolas de gramíneas tropicales (Mexican Institute of Industrial Property Patent No. MX/E/2017/041875). <https://vidoc.impi.gob.mx/visor?d=MX/E/2017/041875>
- Baron, N. C., & Rigobelo, E. C. (2022). Endophytic fungi: a tool for plant growth promotion and sustainable agriculture, *Mycology*, 13(1), 39-55. <https://doi.org/10.1080/21501203.2021.1945699>
- Beckerman, J., Palmer, C., Tedford, E., & Ypema, H. (2023). Fifty years of fungicide development, deployment, and future use. *Phytopathology*, 113(4), 694-706. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-22-0399-1A>
- Bhardwaj, N. R., & Kumar, J. (2017). Characterization of volatile secondary metabolites from *Trichoderma asperellum*. *Journal of Applied and Natural Science*, 9(2), 954-959. <https://doi.org/10.31018/jans.v9i2.1303>
- Birari, B., Ingle, S., Mane, S., & Bramhankar, S. (2025). Fungicidal profiling of *Trichoderma asperellum* mutants released volatile and non-volatile compounds against *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceri*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 58(2), 59-91. <https://doi.org/10.1080/03235408.2024.2448279>
- Cabrera, M., Garmendia, G., Rufo, C., Pereyra, S., & Vero, S. (2020). *Trichoderma atroviride* como controlador biológico de fusariosis de espiga de trigo mediante la reducción del inóculo primario en rastrojo. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 629-651. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.664>
- Celis-Perera, S. E., Cristóbal-Alejo, J., Reyes-Ramírez, A., Garruña-Hernández, R., Tun-Suarez, J. M., & Gamboa-Angulo, M., (2023). *Trichoderma asperellum* Ta13-17 in the growth of *Solanum lycopersicum* and biocontrol of *Corynespora cassicola*. *Mexican Journal of Phytopathology*, 41(1), 70-81. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2207-1>
- Chantrapromma, S., Jeerapong, C., Phupong, W., Quah, C. K., & Fun, H. K. (2014). Trichodermaerin: a diterpene lactone from *Trichoderma asperellum*. *Acta Crystallographica, Structure Reports*, 70(4), 1-11. <https://doi.org/10.1107/S1600536814004632>
- Chen, C., Liu, L., Ye, S., Li, J., Wu, L., Li, J., ... & Long, Y. (2024). New steroids from mangrove-associated fungus *Trichoderma asperellum* SCNU-F0048. *Steroids*, 208, 109449. <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2024.109449>
- Chen, J., Yuan, J., & Huang, X. (2020). New *Trichoderma asperellum* strain HTTA-Z0002 is deposited at China General Microbiological Culture Collection Center under preservation number (China National Intellectual Property Administration Patent No. CN109112071B). <https://patents.google.com/patent/CN109112071B>
- Chua, R. W., Song, K. P., & Ting, A. S. Y. (2024). Characterization and antimicrobial activities of bioactive compounds from endophytic *Trichoderma asperellum* isolated from *Dendrobium* orchids. *Biology*, 79, 569-584. <https://doi.org/10.1007/s11756-023-01562-9>
- Clarivate. (2024). Web of Science Core Collection. Consultado el 16 de diciembre, 2024, desde <https://www.webofscience.com>
- Cortés-Hernández, F. C., Alvarado-Castillo, G., & Sánchez-Viveros, G. (2023). *Trichoderma* spp., una alternativa para la agricultura sostenible: una revisión. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 25(2), 73-87. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v25n2.111384>
- Cruz, T. A., Rivero, G. D., Martínez, C. B., Echevarría, H. A., & Rodríguez, A. T. (2017). Evaluación de la actividad antifúngica de *Trichoderma asperellum* Samuels ante patógenos fúngicos que afectan al cultivo de la soya (*Glycine max* L.). *Cultivos Tropicales*, 38(4), 15-21.
- Dean, R., Van Kan, J. A. L., Pretorius, Z. A., Hammond-Kosack, K. E., Di Pietro, A., Spanu, P. D., Rudd, J. J., ..., & Foster, G. D. (2012). The top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 13(4), 414-430. <https://doi.org/10.1111/J.1364-3703.2011.00783.X>

- Degani, O., Khatib, S., Becher, P., Gordani, A., & Harris, R. (2021). *Trichoderma asperellum* secreted 6-pentyl- α -pyrone to control *Magnaportheopsis maydis*, the maize late wilt disease agent. *Biology*, 10(9), 1-16. <https://doi.org/10.3390/biology10090897>
- Del Castillo, S. E., Arroyo, V. L. A., Avila, M. M. E., & Soto, M. R. (2023). *Formulación para el control biológico de hongos causantes de enfermedades foliares y radicales en plantas* (Mexican Institute of Industrial Property Patent No. MX/E/2022/020638). <https://vidoc.impi.gob.mx/visor?d=MX/E/2022/020638>
- Elshahawy, I. E., & Marrez, D. A. (2024). Antagonistic activity of *Trichoderma asperellum* against *Fusarium* species, chemical profile and their efficacy for management of *Fusarium*-root rot disease in dry bean. *Pest Management Science*, 80(3), 1153-1167. <https://doi.org/10.1002/ps.7846>
- Fu, L.-Q., Xiong, R., Wang, M., Zuo, J.-Y., Jing, F.-J., Yang, H.-L., & Li, H. (2023). *Use of Trichoderma asperellum in improving gibberellic acid yield in gibberellic acid fermentation residual liquid and obtaining gibberellic acid fermentation liquor, gibberellic acid product and plant regulator or bio-fertilizer, is Trichoderma asperellum GDSF1009* (China National Intellectual Property Administration Patent No. CN116790704A). <https://patents.google.com/patent/CN116790704A>
- Gómez, A. L. S., Hernández, E. O., Ahumada, C. A. E., Herrera, R. R., Martínez, M. T. D. J. S., Ramírez, E. N., & Drouaillet, B. E. (2022). Principales enfermedades del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de campo. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinaria*, 6(1), 1-21. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i1.1793
- Gualtieri, L., Monti, M. M., Mele, F., Russo, A., Pedata, P. A., & Ruocco, M. (2022). Volatile organic compound (VOC) profiles of different *Trichoderma* species and their potential application. *Journal of Fungi*, 8(10), 1-15. <https://doi.org/10.3390/jof8100989>
- Guo, Q., Shi, L., Wang, X., Li, D., Yin, Z., Zhang, J., ... & Chen, L. (2023). Structures and biological activities of secondary metabolites from the *Trichoderma* genus (covering 2018-2022). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(37), 13612-13632. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04540>
- Guzmán-Guzmán, P., Kumar, A., de Los Santos-Villalobos, S., Parra-Cota, F. I., Orozco-Mosqueda, M. D. C., Fadji, A. E., ... & Santoyo, G. (2023). *Trichoderma* Species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases- a review. *Plants*, 12(3), 1-35. <https://doi.org/10.3390/plants12030432>
- Hao, J., Wuyun, D., Xi, X., Dong, B., Wang, D., Quan, W., ... & Zhou, H. (2023). Application of 6-pentyl-a-pyrone in the nutrient solution used in tomato soilless cultivation to inhibit *Fusarium oxysporum* hf-26 growth and development. *Agronomy*, 13(5), 1-13. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051210>
- Huang, S.-P., Mo, J.-Y., Li, Q.-L., Guo, T.-X., & Tang, L.-H. (2022). *Trichoderma asperellum* TZ312 and application thereof; volatile product metabolism of *Trichoderma asperellum* TZ312 and application thereof (China National Intellectual Property Administration Patent No. CN111893046B). <https://patents.google.com/patent/CN111893046B>
- Hermosa, R., Cardoza, R. E., Rubio, M. B., Gutierrez, S., & Monte, E. (2014). Chapter 10-secondary metabolism & antimicrobial metabolites of *Trichoderma* (Eds.), *Biotechnology and Biology of Trichoderma*. (pp. 125-137). Amsterdam: Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-59576-8.00010-2>
- Index Fungorum. (2025). *Index Fungorum*. Consultado el 16 de diciembre, 2024, desde <https://www.indexfungorum.org>
- IMPI (Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial). (2025). Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial: misión, funciones y administración de patentes en México. Ciudad de México, México: IMPI.
- Intana, W., Kheawlang, S., & Sunpapao, A. (2021). *Trichoderma asperellum* T76-14 released volatile organic compounds against postharvest fruit rot in muskmelons (*Cucumis melo*) caused by *Fusarium incarnatum*. *Journal of Fungi*, 7(1), 1-13. <https://doi.org/10.3390/jof7010046>
- Ji, H., Yu, R., Liu, H., Zhang, H., Wang, X., Chen, J., & Li, Y. (2023). Metabolic features of a novel *Trichoderma asperellum* YNQJ1002 with potent antagonistic activity against *Fusarium graminearum*. *Metabolites*, 13(11), 1-17. <https://doi.org/10.3390/metabo13111144>
- Jiménez-Valadez, A. (2025). Sobre las biopatentes: el estado de la materia biológica en el sistema de patentes y problemáticas derivadas. *Bioética y Derecho*, 64, 176-196. <https://doi.org/10.1344/rbd2025.64.48836>
- Karupiah, V., Sun, J., Li, T., Vallikkannu, M., & Chen, J. (2019). Co-cultivation of *Trichoderma asperellum* GDFS1009 and *Bacillus amyloliquefaciens* 1841 causes differential gene expression and improvement in the wheat growth and biocontrol activity. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01068>
- Li, Q.-L., Zhao, J., Mo, J.-Y., Guo, T.-X., Tang, L.-H., & Huang, S.-P. (2022). *New Trichoderma asperellum N-8-2 useful for preparing plant disease inhibitor for inhibiting plant diseases caused by anthracnose, white rot fungus, intercropping fungi, and Alternaria* (China National Intellectual Property Administration Patent No. CN109868225B). <https://patents.google.com/patent/CN109868225B>
- Li, M. F., Li, G. H., & Zhang, K. Q. (2019). Non-volatile metabolites from *Trichoderma* spp. *Metabolites*, 9(3), 1-24. <https://doi.org/10.3390/metabo9030058>
- Lieckfeldt, E., Samuels, G. J., Nirenberg, H. I., & Petrini, O. (1999). A morphological and molecular perspective of *Trichoderma viride*: is it one or two species? *Applied and Environmental Microbiology*, 65(6), 1-10. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.6.2418-2428.1999>
- López-Calva, V., Villa, M., Quezada, A., Mendoza, A., & Anducho, M. (2018). El género *Trichoderma* una herramienta agrobiotecnológica. *Ciencias Biológicas y de la Salud*, 2(1) 1-11.
- Manzar, N., Kashyap, A. S., Goutam, R. S., Rajawat, M. V. S., Sharma, P. K., Sharma, S. K., & Singh, H. V. (2022). *Trichoderma*: advent of versatile biocontrol agent, its secrets and insights into mechanism of biocontrol potential. *Sustainability*, 14(19), 1-32. <https://doi.org/10.3390/su141912786>
- Martínez, B. M., Martínez, B. L., & Avendaño, A. C. H. (2024). *Biofungicida derivado de cepas de Trichoderma asperellum para el control biológico de la moniliasis del cacao (Theobroma cacao L.)* (Mexican Institute of Industrial Property Patent No. MX/E/2024/033781). <https://vidoc.impi.gob.mx/visor?d=MX/E/2024/033781>
- Martínez-Padrón, H. Y., Osorio-Hernández, E. O., Estrada-Drouaillet, B., López-Santillán, J. A., Varela-Fuentes, S. E., & Torres-Castillo, J. A. (2017). Control biológico de fitopatógenos mediante aislados de *Trichoderma* spp. *Agro Productividad*, 10(3), 9-14. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.352637>
- Martínez, B., Infante, D., & Reyes, Y. (2013). *Trichoderma* spp. y su función en el control de plagas en los cultivos. *Revista de Protección Vegetal*, 28(1), 1-11.
- Mendoza-Mendoza, A., Esquivel-Naranjo, E. U., Soth, S., Whelan, H., Alizadeh, H., Echaide-Aquino, J. F., ... & Hampton, J. G. (2024). Uncovering the multifaceted properties of 6-pentyl-alpha-pyrone for control of plant pathogens. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1-20. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1420068>
- Mukherjee, P. K., Horwitz, B. A., Herrera-Estrella, A., Schmoll, M., & Kenerley, C. M. (2013). *Trichoderma* Research in the Genome Era. *Annu. Annual review of phytopathology*, 51(1), 105-129. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102353>
- Mukhopadhyay, R., & Kumar, D. (2020). *Trichoderma*: A Beneficial Antifungal Agent and Insights into Its Mechanism of Biocontrol Potential. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30, (133), 1-8.. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00333-x>

- Murali, M., Naziya, B., Ansari, M. A., Alomary, M. N., AlYahya, S., Almatroudi, A., ... & Amruthesh, K. N. (2021). Bioprospecting of rhizosphere-resident fungi: their role and importance in sustainable agriculture. *Journal of Fungi*, 7(4), 1-26. <https://doi.org/10.3390/jof7040314>
- OEPM (Oficina Española de Patentes y Marcas) (2018) ¿Qué es una patente? Consultado el 16 de diciembre, 2024, desde https://www.oepm.es/export/sites/oepm/comun/documentos_relacionados/Publicaciones/Folletos/2018_04_26_Folletos_Que_es_una_patente.pdf
- Pan, R., Bai, X., Chen, J., Zhang, H., & Wang, H. (2019). Exploring structural diversity of microbe secondary metabolites using OSMAC strategy: a literature review. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1-20. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00294>
- Persoon, C. H. (1794). Dispositio methodica fungorum. *The Botanical Magazine*, 1(81), 128.
- Rayhane, H., Molinet, J., Mitropoulou, G., Kourkoutas, Y., Dupuy, N., Masmoudi, A., & Roussos, S. (2019). From flasks to single used bioreactor: scale-up of solid-state fermentation process for metabolites and conidia production by *Trichoderma asperellum*. *Journal of Environmental Management*, 252, 109496. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109496>
- Rifai, M. A. (1969). A revision of the genus *Trichoderma*. *Mycological Papers*, 116(11), 1-56. <https://doi.org/10.1139/b91-298>
- Ronnie-Gakegne, E., & Martínez-Coca, B. (2018). Antibiosis y efecto de pH-temperatura sobre el antagonismo de cepas de *Trichoderma asperellum* frente a *Alternaria solani*. *Revista de Protección Vegetal*, 33(2), 1-9.
- Samuels, G. J., Lieckfeldt, E. L. K. E., & Nirenberg, H. I. (1999). *Trichoderma asperellum*, a new species with warted conidia, and redescription of *T. viride*. *Sydowia*, 51(1), 71-88.
- Samuels, G. J., Ismaiel, A., Bon, M. C., De Respinis, S., & Petrini, O. (2010). *Trichoderma asperellum sensu lato* consists of two cryptic species. *Mycology*, 102(4), 944-966. <https://doi.org/10.3852/09-243>
- Schulz-Bohm, K., Martín-Sánchez, L., & Garbeva, P. (2017). Microbial volatiles: small molecules with an important role in intra-and inter-kingdom interactions. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02484>
- Shang, J., Xu, Z., Tang, M., Lin, Q., Chen, S., Jiang, H., & Wang, X. (2019). New *Trichoderma asperellum* TC01 useful for promoting tea seedling growth and inhibiting tea anthracnose pathogen *Colletotrichum gloeosporioides* and apple rot pathogen *Phytophthora plurivora* (China National Intellectual Property Administration Patent No. CN109749943A). <https://patents.google.com/patent/CN109749943A>
- Sharma, I. P., & Sharma, A. K. (2020). *Trichoderma-Fusarium* Interactions: A Biocontrol Strategy to Manage Wilt. En A. Sharma & P. Sharma (Eds.). *Trichoderma, rhizosphere biology*. (pp. 167-180). Singapore: Springer Nature Pte Ltd https://doi.org/10.1007/978-981-15-3321-1_9
- Shavkiev, J., Karimov, H. Kh., Turaeva, B. I., Azimova, N. Sh., Nazirbekov, & Muminovna K. M. (2022). Some volatile metabolites produced by the antifungal-*Trichoderma asperellum* uz-a4 micromycete. *International Journal of Phytopathology*, 11(03), 239-251. <https://doi.org/10.33687/phytopath.011.03.4263>
- Shemshura, O., Shemsheeva, Z., Alimzhanova, M., Sadanov, A., Bozena, L., & Khalima, K. (2024). Antifungal activity of *Trichoderma asperellum* and a profile of its volatile organic compounds. *Pakistan Journal of Botany*, 56(3), 1187-1191.
- Shu, C., Zhang, Y., Zheng, P., Liu, X., Chen, C., Zhou, E., ... & Fan, Y. Z. (2022). Strain of *Trichoderma asperellum* YN4 useful in prevention and control of fungi or preparation of fungicides (China National Intellectual Property Administration Patent No. CN114410481A). <https://patents.google.com/patent/CN114410481A>
- Singh, R., Anbazhagan, P., Viswanath, H. S., & Tomer, A. (2020). *Trichoderma* Species: A Blessing for Crop Production. In *Trichoderma: Agricultural Applications and Beyond* (pp. 127-158). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-54758-5>
- Sood, M., Kapoor, D., Kumar, V., Sheteyi, M. S., Ramakrishnan, M., Landi, M., ... & Sharma, A. (2020). *Trichoderma*: The "secrets" of a multitasking biocontrol agent. *Plants*, 9(6), 1-25. <http://doi.org/10.3390/plants9060762>
- Stracquadanio, C., Quiles, J. M., Meca, G., & Cacciola, S. O. (2020). Antifungal activity of bioactive metabolites produced by *Trichoderma asperellum* and *Trichoderma atroviride* in liquid medium. *Journal of Fungi*, 6(4), 263. <https://doi.org/10.3390/jof6040263>
- Sunkad, G., Joshi, R., & Patil, M. (2023). Identification of bio-active compounds in indigenous *Trichoderma asperellum* against *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris*: a causal agent of chickpea wilt. *Journal of Biological Control*, 37(4), 220-225. <https://doi.org/10.18311/jbc/2023/34295>
- Tamandegani, P. R., Marik, T., Zafari, D., Balázs, D., Vágvolgyi, C., Szekeres, A., & Kredics, L. (2020). Changes in peptaibol production of *Trichoderma* species during *in vitro* antagonistic interactions with fungal plant pathogens. *Biomolecules*, 10(5), 1-19. <https://doi.org/10.3390/biom10050730>
- Tanaka, S., & Kahmann, R. (2021) Cell wall-associated effectors of plant-colonizing fungi. *Mycologia*, 113(2), 247-260. <https://doi.org/10.1080/00275514.2020.1831293>
- Tukhbatova, R. I., Alimova, F. K., Zalyalyutdinova, L. M., & Bikmullin, A. G. (2019). *Trichoderma asperellum* strain-producer of hydrolytic enzymes and peptide metabolites and its application (Eurasian Patent Organization Patent No. EA33116B1). <https://patents.google.com/patent/EA33116B1>
- Velasco-Silva, J. L., & Vicente-Maguey, F. J. (2024). *Un inoculante biológico como tratamiento de semillas para mejorar el rendimiento y la protección en los cultivos* (Mexican Institute of Industrial Property Patent No. MX/W/2024/038287). <https://vidoc.impi.gob.mx/visor?d=MX/2024/38287>
- Villa-Martínez, A., Pérez-Leal, R., Morales-Morales, H. A., Basurto-Sotelo, M., Soto-Parra, J. M., & Martínez-Escudero, E. (2014). Situación actual en el control de *Fusarium* spp. y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. *Acta Agronómica*, 64(2), 194-205. <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n2.43358>
- Verma, M., Brar, S. K., Tyagi, R. D., Surampalli, R. N., & Valero, J. R. (2007). Antagonistic fungi, *Trichoderma* spp.: panoply of biological control. *Biochemical Engineering Journal*, 37(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.05.012>
- Wang, H., Zhang, R., Duan, Y., Jiang, W., Chen, X., Shen, X., ... & Mao, Z. (2021b). The endophytic strain *Trichoderma asperellum* 6S-2: an efficient biocontrol agent against apple replant disease in China and a potential plant-growth-promoting fungus. *Journal of Fungi*, 7(12), 1-27. <https://doi.org/10.3390/jof7121050>
- Wang, X. Y., Xu, T. T., Sun, L. J., Cen, R. H., Su, S., Yang, X. Q., ... & Ding, Z. T. (2021a). The chemical diversity, the attractant, anti-acetylcholinesterase, and antifungal activities of metabolites from biocontrol *Trichoderma harzianum* uncovered by OSMAC strategy. *Bioorganic Chemistry*, 114, 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2021.105148>
- Wonglom, P., Ito, S., & Sunpapao, A. (2020). Volatile organic compounds emitted from endophytic fungus *Trichoderma asperellum* T1 mediate antifungal activity, defence response and promote plant growth in lettuce (*Lactuca sativa*). *Fungal Ecology*, 43, 100867. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2019.100867>
- Wu, Q., Sun, R., Ni, M., Yu, J., Li, Y., Yu, C., ... & Chen, J. (2017). Identification of a novel fungus, *Trichoderma asperellum* GDFS1009, and comprehensive evaluation of its biocontrol efficacy. *PLOS One*, 12(6), e0179957. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179957>
- Xi, L., Hu, Y., Lou, B., Jiang, Z., Luorong, Z., & Long, X. (2016). New *Trichoderma asperellum* used for the preparation of antimicrobial metabolites to prepare antimicrobial agents and disinfectants (China National Intellectual Property Administration Patent No. CN105695334A). <https://patents.google.com/patent/CN105695334A>

- Yin, C.-M., Wang, H., Mao, Z.-Q., Liu, X., Lv, Y., Chen, X.-S., & Shen, X. (2021). *New Trichoderma asperellum 6S-2 useful for producing protease, cellulase, laccase and amylase and generating indole-3-acetic acid, iron carrier and ammonia gas* (China National Intellectual Property Administration Patent No. CN113817613A). <https://patents.google.com/patent/CN113817613A>
- Zamora, A., Cabezas, E., Juárez, D., León, I., & Martinuz, A. (2023). Catálogo de insumos biológicos - Aislados autóctonos de *Trichoderma* y *Rhizobium* spp. en Nicaragua. Managua, FAO, 1-73. <http://doi.org/10.4060/cc6155es>
- Zeilinger, S., Gruber, S., Bansal, R., & Mukherjee, P. K. (2016). Secondary metabolism in *Trichoderma* e chemistry meets genomics. *Fungal Biology Reviews*, 30(2), 74-90. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2016.05.001>
- Zhang, C.-S., Zhao, D.-L., Lin, W., Lin, Q., Zhang, X.-F., Song, J.-Y., ... & Ye, C. (2024). *Use of undecylenic acid for preventing and treating Phytophthora disease, where undecylenic acid is prepared by mixing Bacillus subtilis oscillation culture and Trichoderma asperellum oscillation culture, co-fermenting, filtering co-fermentation liquid, and extracting and separating fermentation extract* (China National Intellectual Property Administration Patent No. CN115590023B). <https://patents.google.com/patent/CN115590023B>
- Zin, N. A., & Badaluddin, N. A. (2020). Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(2), 168-178. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2020.09.003>