

Trichoderma fungi as an agricultural biological control in Mexico

Hongos *Trichoderma* como control biológico agrícola en México

Miguel Angel Matas-Baca¹; María Antonia Flores-Córdova^{1*}; Sandra Pérez-Álvarez¹; María Janeth Rodríguez-Roque¹; Nora Aideé Salas-Salazar¹; Mayra Cristina Soto-Caballero¹; Esteban Sánchez-Chávez²

¹Universidad Autónoma de Chihuahua. C. Escorza, núm. 900, Col. Centro, Chihuahua, Chihuahua, C. P. 31000, México.

²Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. Av. Cuarta Sur, núm. 3828, Pablo Gómez, Delicias, Chihuahua, C. P. 33088, México.

*Corresponding author: mafloresc@uach.mx

Abstract

Environmental pollution, food sufficiency, and health are among the main challenges for sustainable crop production in Mexico. The main tool for plant protection is chemical pesticides, but environmental safety and risks to animal and human health have prompted the community and scientists to propose alternatives for their integrated management. This has encouraged the inclusion of biological products, such as species of the antagonistic fungus *Trichoderma* spp., which act against pests and pathogens in different crops, and are environmentally benign, effective and economically viable. The aim of this paper was to compile information on *Trichoderma* spp. regarding their taxonomy, ecology, use as biological control, isolation, culture, morphological and molecular identification, mode of action, distribution of native species, and availability of international commercial products and those produced in Mexico. For this purpose, information was selected from indexed journals and suppliers of *Trichoderma* spp. on open data digital platforms. The exposed information could be useful for Mexican farmers, to know, accept and use biological control with *Trichoderma* spp. in their crops, for the benefit of quality agriculture and pesticide-free crops. In addition, research could be generated to develop new autochthonous products based on *Trichoderma* spp. that are more effective against pests and diseases native to Mexico.

Keywords: antagonist, biopesticide, entomopathogen, integrated crop management, mycoparasite.

Resumen

La contaminación ambiental, la suficiencia alimentaria y la salud se encuentran entre los principales desafíos para la producción de cultivos sostenibles en México. La principal herramienta para la protección vegetal son los plaguicidas químicos, pero la seguridad ambiental y los riesgos para la salud, animal y humana, han instado a la comunidad y a los científicos a proponer alternativas para su manejo integral. Esto ha incentivado la inclusión de productos biológicos, como las especies del hongo antagonista *Trichoderma* spp., que actúan contra plagas y patógenos en diferentes cultivos, y son ambientalmente benignas, efectivas y económicamente viables. El objetivo de este artículo fue recopilar información sobre *Trichoderma* spp. en cuanto a su taxonomía, ecología, uso como control biológico, aislamiento, cultivo, identificación morfológica y molecular, forma de acción, distribución de especies nativas, y disposición de productos comerciales de nivel internacional y los producidos en México. Para este fin, se seleccionó información de revistas indexadas y proveedores de *Trichoderma* spp. en plataformas digitales de datos abiertos. La información expuesta podría ser útil para los agricultores mexicanos, para conocer, aceptar y emplear el control biológico con *Trichoderma* spp. en sus cultivos, en beneficio de una agricultura de calidad y de cultivos libres de pesticidas. Además, se podrían generar investigaciones para elaborar nuevos productos autóctonos a base de *Trichoderma* spp., que resulten más efectivos contra plagas y enfermedades nativas de México.

Palabras clave: antagonista, bioplaguicida, entomopatógeno, manejo integrado de cultivos, micoparásito.



Introduction

Agriculture is the most important activity for human nutrition. The modern agricultural model has increased its productivity; however, since it is based on the use of pesticides, its sustainability is questioned, due to the series of ecological, economic and health impacts that they cause (Sarandón & Flores, 2014). For this reason, sustainable food production is a challenge for humanity, which requires transforming conventional forms of production to achieve increases in crop yields and quality and to minimize the negative impact of pesticides on the environment (López, Pelagio, & Herrera, 2015).

In Mexico, agricultural production during recent decades has favored the development of corporate farming, characterized by specialized monocultures, in which the intensive use of highly toxic pesticides is the dominant way to counteract the pests and diseases that affect them (González, 2014). Restricting the use of chemical pesticides would result in lower yields and higher food prices (Storck, Karpouzias, & Martin-Laurent, 2017).

The potato (*Solanum tuberosum* L.) crop is of great economic importance since it is the third most consumed food in the world (Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación [FAO], 2021), and, in Mexico, its yield is affected by phytopathogens such as *Phytophthora infestans* Mont De Bary, which causes late blight, one of the most devastating potato crop diseases (Kerroum, Nouredine, Henni, & Mabrouk, 2015). The most widely used method to control this and other diseases is chemical, with effective results, but with residual effects due to the accumulation of toxic substances in water bodies, soil, plants and animals (Miller & Johnson, 2000). Concern about the damage caused by the excessive use of synthetic pesticides has led to a widespread rejection of chemical pest control in agriculture (Sarwar, 2015).

Although the symptoms of acute poisonings are well characterized, prolonged exposure to subclinical concentrations is a cause for concern as it is associated with cognitive impairment, reproductive disorders, cancer, diabetes, neurobehavioral disorders, and congenital malformations, as well as cardiovascular, respiratory, and neurodegenerative diseases, such as Parkinson's disease (Mostafalou & Abdollahi, 2017).

Biological control is based on the reduction of plant pests and diseases through the use of natural organisms called biopesticides, which contribute to integrated crop management and avoid, where possible, the use of agrochemicals that are toxic to the environment. These organisms are known as antagonists and are the subject of various studies in many fields of agricultural

Introducción

La agricultura es la actividad más importante para la alimentación humana. El modelo de agricultura moderno ha aumentado su productividad; sin embargo, al estar basado en el uso de plaguicidas se cuestiona su sustentabilidad, debido a la serie de impactos ecológicos, económicos y de salud que provocan (Sarandón & Flores, 2014). Por esta razón, la producción sostenible de alimentos es un desafío para la humanidad, la cual requiere transformar las formas convencionales de producción para lograr aumentos en los rendimientos, la calidad de cultivos y minimizar el impacto negativo de plaguicidas sobre el medio ambiente (López, Pelagio, & Herrera, 2015).

En México, la producción agrícola, durante las últimas décadas, ha favorecido el desarrollo de la agricultura empresarial, caracterizada por monocultivos especializados, en los que el uso intensivo de plaguicidas altamente tóxicos es la forma dominante de contrarrestar las plagas y enfermedades que los afectan (González, 2014). La restricción del uso de plaguicidas químicos tendría como consecuencia bajos rendimientos y precios más elevados de los alimentos (Storck, Karpouzias, & Martin-Laurent, 2017).

El cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) tiene gran importancia económica, ya que es el tercer alimento más consumido en el mundo (Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación [FAO], 2021), y, en México, su rendimiento se ve afectado por fitopatógenos como *Phytophthora infestans* Mont De Bary, causante del tizón tardío, una de las enfermedades más devastadoras del cultivo (Kerroum, Nouredine, Henni, & Mabrouk, 2015). El método más utilizado para controlar esta y otras enfermedades es el químico, con resultados efectivos, pero con efectos residuales por la acumulación de sustancias tóxicas en cuerpos de agua, suelo, plantas y animales (Miller & Johnson, 2000). La preocupación de los daños por el uso excesivo de plaguicidas sintéticos ha provocado un rechazo generalizado hacia el control químico de plagas en la agricultura (Sarwar, 2015).

Aunque los síntomas de las intoxicaciones agudas están bien caracterizados, la exposición prolongada a concentraciones subclínicas es motivo de preocupación, ya que se asocia con deterioro cognitivo, trastornos reproductivos, cáncer, diabetes, trastornos neuroconductuales y malformaciones congénitas, así como enfermedades cardiovasculares, respiratorias y neurodegenerativas, como el Parkinson (Mostafalou & Abdollahi, 2017).

El control biológico se basa en la reducción de plagas y enfermedades en las plantas mediante el

research. There is a great diversity of biological control agents in ecosystems, so it is necessary to isolate them in order to put them into use (López et al., 2015). Some of their advantages are low production costs, long-lasting permanence in the soil once established, beneficial effects on non-pathogenic organisms, crop health, and safety in plants, animals, and humans (Ghazanfar, Raza, Raza, & Qamar, 2018). However, they are difficult to reproduce and establish in crops, are highly specific, and are not systemic, in addition to which exotic agents can displace native organisms and become pests (Companiononi-González, Domínguez-Arizmendi, & García-Velasco, 2019).

Biological control is based on the reduction of plant pests and diseases through the use of natural organisms called biopesticides, which contribute to integrated crop management and avoid, where possible, the use of agrochemicals that are toxic to the environment. These organisms are known as antagonists and are the subject of various studies in many fields of agricultural research. There is a great diversity of biological control agents in ecosystems, so it is necessary to isolate them in order to put them into use (López et al., 2015). Some of their advantages are low production costs, long-lasting permanence in the soil once established, beneficial effects on non-pathogenic organisms, crop health, and safety in plants, animals, and humans (Ghazanfar, Raza, Raza, & Qamar, 2018). However, they are difficult to reproduce and establish in crops, are highly specific, and are not systemic, in addition to which exotic agents can displace native organisms and become pests (Companiononi-González, Domínguez-Arizmendi, & García-Velasco, 2019).

Trichoderma species have been studied for decades as antagonists of phytopathogenic fungi and insects; however, it wasn't until the beginning of this century that their commercialization as biofungicides began, thanks to the change in the agricultural model that demands obtaining healthier foods with a lower chemical residue content (Pineda-Insuasti et al., 2017). Thus, with *Trichoderma* spp. products marketed worldwide, organic agriculture and the reduced use of chemical pesticides are promoted (Haas & Défago, 2005).

It is necessary to consider that phytopathogens have some natural biological antagonist that is native to the soil, so it is suggested that native strains are more effective than imported ones (Martínez et al., 2008). In this sense, success in the formulation and commercialization of preparations based on *Trichoderma* spp. for Mexican agriculture requires studies on the selection of promising native isolates, whose use contributes to sustainable development that allows responding to the demand for food products (Companiononi-González et al., 2019).

uso de organismos naturales llamados biopesticidas, los cuales contribuyen a un manejo integrado de los cultivos y evitan, en lo posible, el uso de agroquímicos tóxicos para el medio ambiente. Estos organismos son conocidos como antagonistas, y son objeto de diversos trabajos en muchos campos de la investigación agrícola. Existe una gran diversidad de agentes de control biológico en los ecosistemas, por lo que es necesario aislarlos para ponerlos en uso (López et al., 2015). Algunas de sus ventajas son el bajo costo de producción, permanencia duradera en los suelos una vez establecidos, efectos benéficos en los organismos no patogénicos, sanidad en los cultivos e inocuidad en plantas, animales y humanos (Ghazanfar, Raza, Raza, & Qamar, 2018). No obstante, son difíciles de reproducir y establecer en los cultivos, son muy específicos, no son sistémicos, y los agentes exóticos pueden desplazar los organismos nativos y convertirse en plaga (Companiononi-González, Domínguez-Arizmendi, & García-Velasco, 2019).

Trichoderma spp. son hongos cosmopolitas que se encuentran de forma natural en el suelo y ofrecen varios beneficios a los cultivos, como solubilización de nutrientes (Igiehon & Babalola, 2018), tolerancia al estrés abiótico y biótico (Stringlis, Zhang, Pieterse, Bolton, & Jonge, 2018), e inducción de sistemas de defensa en las plantas (Malmierca et al., 2015). Estos hongos interactúan como simbiosis, suprimen el crecimiento de fitopatógenos con mecanismos directos (como el parasitismo y la antibiosis), compiten por espacio y nutrientes, e interfieren en el mecanismo de respiración de patógenos al producir metabolitos de desecho como el cianuro de hidrógeno, amoníaco y dióxido de carbono; además, participan en el bloqueo fisicoquímico de los poros del suelo (Ghazanfar et al., 2018).

Las especies de *Trichoderma* se han estudiado durante décadas como antagonistas de hongos e insectos fitopatógenos; sin embargo, hasta principios de este siglo, se inició su comercialización como biofungicidas, gracias al cambio de modelo agrícola que exige la obtención de alimentos más saludables y con menor contenido de residuos químicos (Pineda-Insuasti et al., 2017). De esta manera, con los productos de *Trichoderma* spp. que se comercializan mundialmente, se promueve la agricultura orgánica y la reducción del uso de pesticidas químicos (Haas & Défago, 2005).

Es necesario considerar que los fitopatógenos tienen algún antagonista biológico natural que es autóctono del suelo, por lo que se plantea que las cepas nativas son más efectivas que las importadas (Martínez et al., 2008). En este sentido, el éxito en la formulación y comercialización de preparados a base de *Trichoderma* spp. para la agricultura mexicana requiere de estudios en la selección de aislados nativos promisorios, cuyo uso contribuya a un desarrollo sustentable que permita

This paper is a literature review of the antagonistic fungus *Trichoderma* spp., which can control phytopathogens that affect different crops, as well as of its multiple benefits and the native microorganisms belonging to its genus that are registered in Mexico. Therefore, the aim of this review was to gather information concerning the antagonistic fungus *Trichoderma* spp., its taxonomy, ecology, use as biological control, isolation, culture, morphological and molecular identification, modes of action, and, briefly, the distribution of native species in Mexico and the availability of some national and international commercial products.

Methodology

For this literature review of *Trichoderma*, information was obtained from the Agris, BioOne, Elsevier, Google Scholar, Redalyc, SciELO, and Scopus databases. The keywords used were *Trichoderma* spp. in combination with antagonistic microorganisms, mycoparasitism, antibiosis, secondary metabolites, native microorganisms and commercial products. A total of 154 citations were obtained, of which 114 were consulted. In selecting the articles, emphasis was placed on agricultural, environmental, ecological, genetic, geographical, horticultural and social criteria.

Taxonomy

Fungi of the genus *Trichoderma* spp. descend from the following lineage: Eukaryota domain, Opisthokonta supergroup, Fungi kingdom, Dikarya superdivision, Eumycota subkingdom, Ascomycota division, saccharomyceta subdivision, Pezizomycotina subdivision, leotiomyceta subdivision, Sordariomycetes class, Hypocreomycetidae suborder and Hypocreaceae family. They are saprophytes, have mycelium with simple septa, reproduce asexually, are haploid, and their wall is composed of chitin and glucan (Companiononi-González et al., 2019). At the beginning of the use of *Trichoderma* spp. about 30 species were identified; currently, with molecular biotechnology, more than 100 species have been distinguished (Torres de la Cruz et al., 2015).

Ecology

Trichoderma spp. are common in decaying bark and on the surface of plant roots (Carreras-Villaseñor, Sánchez-Arreguin, & Herrera-Estrella, 2012). Their success in the ecosystem as natural decomposers is thanks to their high enzymatic capacity to degrade substrates (Companiononi-González et al., 2019), their accelerated growth capacity, their nutrient absorption capacity, and their survival in soils with different adverse environmental conditions and amounts of organic

responder a la demanda de productos alimenticios (Companiononi-González et al., 2019).

Este trabajo es una revisión bibliográfica sobre el hongo antagonista *Trichoderma* spp., el cual puede controlar fitopatógenos que afectan diferentes cultivos, así como sus múltiples beneficios y los microorganismos nativos pertenecientes a su género que están registrados en México. Por ello, el objetivo de esta revisión fue conjuntar información concerniente al hongo antagonista *Trichoderma* spp., su taxonomía, ecología, uso como control biológico, aislamiento, cultivo, identificación morfológica y molecular, modos de acción y, de forma breve, la distribución de especies nativas en México y la disposición de algunos productos comerciales nacionales e internacionales.

Metodología

Para la revisión bibliográfica de *Trichoderma*, se obtuvo información de las bases de datos de Agris, BioOne, Elsevier, Google Scholar, Redalyc, SciELO y Scopus. Las palabras clave utilizadas fueron *Trichoderma* spp. en combinación con microorganismos antagónicos, micoparasitismo, antibiosis, metabolitos secundarios, microorganismos nativos y productos comerciales. Se obtuvieron 154 citas, de las cuales se consultaron 114. Para seleccionar los artículos, se enfatizó en criterios agrícolas, ambientales, ecológicos, genéticos, geográficos, hortícolas y sociales.

Taxonomía

Los hongos del género *Trichoderma* spp. descienden del siguiente linaje: dominio Eukaryota, supergrupo Opisthokonta, reino Fungi, superdivisión Dikarya, subreino Eumycota, división Ascomycota, subdivisión saccharomyceta, subdivisión Pezizomycotina, subdivisión leotiomyceta, clase Sordariomycetes, suborden Hypocreomycetidae y familia Hypocreaceae. Son saprofitos, presentan micelio con septos simples, se reproducen asexualmente, son haploides, y su pared está compuesta por quitina y glucano (Companiononi-González et al., 2019). Al inicio del uso de *Trichoderma* spp. se identificaban unas 30 especies; actualmente, con la biotecnología molecular, se distinguen más de 100 especies (Torres de la Cruz et al., 2015).

Ecología

Trichoderma spp. son comunes en la corteza en descomposición y en la superficie de las raíces de las plantas (Carreras-Villaseñor, Sánchez-Arreguin, & Herrera-Estrella, 2012). Su éxito en el ecosistema como descomponedor natural es gracias a su alta capacidad enzimática para degradar sustratos (Companiononi-

matter, as well as to being facultative anaerobes and having a destructive tendency on phytopathogenic microorganisms. All the above allows them to show greater ecological plasticity (Infante, Martínez, González, & Reyes, 2009). Some *Trichoderma* species have a characteristic coconut odor, produced by volatile compounds (Tsai, Tzeng, & Hsieh, 2008).

Trichoderma spp. fungi are widely distributed in almost all soil types except at the poles (Singh et al., 2014). They occur mostly in acid soils (Brotman et al., 2013), in forest or agricultural soils (where they account for up to 15 % of the total fungal propagules), and in grassland soil (with 3 %) (Hagn, Pritsch, Schloter, & Munch, 2003). These fungi are made up of species and strains with different functions that can be found in a wide variety of ecological niches. They have low nutritional requirements, and for their growth they need a temperature range of 25-30 °C (Sandle, 2014). Climate affects their distribution, so the species *Trichoderma hamatum* B. is tolerant of excess humidity, *Trichoderma harzianum* R. is favored in warm climates and *Trichoderma viride* P. prefers cold temperatures (Sarhy-Bagnon, Lozano, Saucedo-Castañeda, & Roussos, 2000).

To combat soil phytopathogens, *Trichoderma* spp. require physiological and environmental factors, such as carbon sources (sodium acetate, starch, maltose, glucose, mannose, fructose, inositol, galactose, sodium citrate, xylose, arabinose, lactose, pectin, polyglycolic acid, ribose and malic acid), optimum pH between 4.5 and 7.5, temperatures between 20 and 37 °C, nitrogen sources (such as calcium nitrate, potassium nitrate, sodium nitrite, sodium nitrate, ammonium sulfate, monoammonium phosphate, ammonium chloride and ammonium nitrate) (Jayaswal, Singh, & Lee, 2003) and darkness, as they are extremely sensitive to light (Steyaert, Weld, Loguercio, & Stewart, 2010). They have high adaptability to ecological conditions, since they can grow exclusively as a saprophyte or interact with animals and plants (Zeilinger, Gruber, Bansal, & Mukherjee, 2016). They exhibit rapid development and can produce structures that tolerate unfavorable environmental conditions and lack of food (Companiononi-González et al., 2019). Considering the above, nutrition, substrate and the environment play an important role in multiplication and mycelial growth in *Trichoderma* spp. (Romero-Arenas et al., 2012), characteristics to be taken into account for their selection for use in Mexican agriculture.

***Trichoderma* spp. as a biological control**

Biocontrol is defined as the use of living organisms to combat agricultural pests and pathogens (Hajek & Eilenberg, 2018). It can also be defined as the control of one organism by another organism, or the control of a causal agent of a disease by an antagonistic

González et al., 2019), su capacidad acelerada de crecimiento, su capacidad de absorción de nutrientes, sobrevivencia en suelos con diferente condición ambiental adversa y cantidad de materia orgánica, así como por ser anaerobias facultativas y tener una tendencia destructiva sobre microorganismos fitopatógenos. Todo lo anterior les permite mostrar una mayor plasticidad ecológica (Infante, Martínez, González, & Reyes, 2009). Algunas especies de *Trichoderma* presentan un olor característico a coco, producido por compuestos volátiles (Tsai, Tzeng, & Hsieh, 2008).

Los hongos de *Trichoderma* spp. se encuentran ampliamente distribuidos en casi todos los tipos de suelo, excepto en los polos (Singh et al., 2014). Se presentan mayormente en suelos ácidos (Brotman et al., 2013), en suelos de bosques o agrícolas (donde representan hasta el 15 % de los propágulos fúngicos totales) y en el suelo de pastizales (con el 3 %) (Hagn, Pritsch, Schloter, & Munch, 2003). Estos hongos están integrados por especies y cepas con diferentes funciones que se pueden encontrar en una amplia variedad de nichos ecológicos. Tienen bajos requerimientos nutricionales, y para su crecimiento necesitan un rango de temperatura de 25-30 °C (Sandle, 2014). El clima afecta su distribución, por lo que la especie *Trichoderma hamatum* B. es tolerante al exceso de humedad, *Trichoderma harzianum* R. se ve favorecida en climas cálidos y *Trichoderma viride* P. prefiere las temperaturas frías (Sarhy-Bagnon, Lozano, Saucedo-Castañeda, & Roussos, 2000).

Para combatir los fitopatógenos del suelo, *Trichoderma* spp. requieren de factores fisiológicos y ambientales, como fuentes de carbono (acetato de sodio, almidón, maltosa, glucosa, manosa, fructosa, inositol, galactosa, citrato de sodio, xilosa, arabinosa, lactosa, pectina, ácido poliglicólico, ribosa y ácido málico), pH óptimos entre 4.5 a 7.5, temperaturas de 20 a 37 °C, fuentes de nitrógeno (como nitrato de calcio, nitrato de potasio, nitrito de sodio, nitrato de sodio, sulfato de amonio, fosfato monoamónico, cloruro de amonio y nitrato de amonio) (Jayaswal, Singh, & Lee, 2003) y oscuridad, ya que son extremadamente sensibles a la luz (Steyaert, Weld, Loguercio, & Stewart, 2010). Tienen alta adaptabilidad a las condiciones ecológicas, ya que pueden crecer exclusivamente de forma saprófita o interactuar con animales y plantas (Zeilinger, Gruber, Bansal, & Mukherjee, 2016). Presentan un rápido desarrollo y pueden producir estructuras que toleran condiciones ambientales desfavorables y falta de alimento (Companiononi-González et al., 2019). Considerando lo anterior, la nutrición, el sustrato y el medio ambiente juegan un papel importante para la multiplicación y el crecimiento micelial en *Trichoderma* spp. (Romero-Arenas et al., 2012), características a tomar en cuenta para su selección de uso en el campo mexicano.

microorganism (Bettiol, Maffia, & Castro, 2014). For 60 years, *Trichoderma* spp. have been known as biological control agents against plant pathogenic fungi (El Komy, Saleh, Eranthodi, & Molan, 2015). Woo et al. (2014) note that *Trichoderma* spp. are the most widely used biological control agents against a broad spectrum of root and shoot pathogens. Likewise, their ability to reduce toxic compounds, accelerate the degradation of organic matter (Vázquez, Barrera, & Bianchinotti, 2015), and develop on diverse substrates with good organic matter content has been demonstrated, which facilitates their mass production for agricultural use (Agamez-Ramos, Zapata-Navarro, Oviedo-Zumaqué, & Barrera-Violeth, 2008).

As a biological control, fungi of the genus *Trichoderma* are present in the soil, and due to their antagonistic actions, they act as parasites, which have demonstrated their effectiveness against pathogens responsible for root infection and the incidence of rot in plants. These actions can be classified as: mycoparasitism (with the secretion of hydrolytic enzymes that act on the cell wall of the host), antibiosis (with the synthesis of antimicrobial secondary metabolites), competition for space or nutrients (with the production of metabolites that interfere with the development of pests) and symbiosis (by favoring growth and inducing resistance to diseases and abiotic stresses in the plants with which they coexist). *Trichoderma* spp. decompose organic matter, so they are considered environmental opportunists, and they have a wide geographical distribution, rapid growth that favors the colonization of their habitats, and a high capacity to parasitize or prey on other fungi. In addition, these fungi can grow in soils without crops, as well as suppress structures and create resistance to existing pathogens, so they can act not only in a curative way but also to prevent diseases (Nascimento et al., 2022). They take nutrients from the fungi they parasitize and from the organic material available in the soil, which favors their decomposition and the proliferation of the fungus (Agamez-Ramos et al., 2008).

Trichoderma spp. are associated with the rhizosphere of plants or are endophytes, so they can promote plant growth and development through the production of organic acids (such as indoleacetic acid [auxins], gibberellic acid [gibberellins], gluconic acid, fumaric acid, and citric acid), and lower soil pH. They promote solubilization of minerals such as phosphorus, iron, magnesium and manganese, which are vital for their metabolism (Sharma, Salwan, & Sharma, 2017). As an example, seed treatment with *Trichoderma* spp. has been a successful technique that ensures that the root is colonized, which benefits the plant (Xue et al., 2017).

***Trichoderma* spp. como control biológico**

El biocontrol se define como el uso de organismos vivos para combatir plagas y patógenos agrícolas (Hajek & Eilenberg, 2018). También, se puede definir como el control de un organismo por otro organismo, o el control de un agente causal de una enfermedad por un microorganismo antagonista (Bettiol, Maffia, & Castro, 2014). Durante 60 años, *Trichoderma* spp. han sido conocidos como agentes de control biológico contra hongos fitopatógenos (El Komy, Saleh, Eranthodi, & Molan, 2015). Woo et al. (2014) mencionan que *Trichoderma* spp. son los agentes de control biológico más utilizados contra un amplio espectro de patógenos de raíces y brotes. Asimismo, se ha demostrado su capacidad para disminuir compuestos tóxicos, acelerar la degradación de materia orgánica (Vázquez, Barrera, & Bianchinotti, 2015) y desarrollarse sobre diversos sustratos con buen contenido de materia orgánica, lo cual facilita la producción masiva para su uso agrícola (Agamez-Ramos, Zapata-Navarro, Oviedo-Zumaqué, & Barrera-Violeth, 2008).

Como control biológico, los hongos del género *Trichoderma* están presentes en el suelo, y debido a sus acciones antagonistas actúan como parásitos, que han demostrado su efectividad contra patógenos responsables de la infección de raíces y la incidencia de pudrición en las plantas. Estas acciones se pueden clasificar como: micoparasitismo (con la secreción de enzimas hidrolíticas que actúan sobre la pared celular del huésped), antibiosis (con la síntesis de metabolitos secundarios antimicrobiales), competencia por espacio o nutrientes (con la producción de metabolitos que interfieren con el desarrollo de plagas) y simbiosis (al favorecer el crecimiento y la inducción de resistencia a enfermedades y estreses abióticos en las plantas con las que conviven). *Trichoderma* spp. descomponen la materia orgánica, por lo que son considerados oportunistas ambientales, y presentan una amplia distribución geográfica, un rápido crecimiento que favorece la colonización de sus hábitats y una alta capacidad de parasitar o depredar a otros hongos. Además, estos hongos pueden crecer en suelos sin cultivos, así como suprimir estructuras y crear resistencia a patógenos existentes, por lo que pueden actuar no solo de forma curativa, sino también para prevenir enfermedades (Nascimento et al., 2022). Toman nutrientes de los hongos que parasitan y del material orgánico disponible en el suelo, lo cual favorece su descomposición y la proliferación del hongo (Agamez-Ramos et al., 2008).

Las especies de *Trichoderma* spp. están asociadas a la rizosfera de las plantas, o son endófitas, por lo que pueden promover el crecimiento y el desarrollo de las

It should be noted that not only the biocontrol agent used is important, but also the way it is applied. Alves-de Aguiar, Gomes-da Cunha, and Lobo (2014) exposed the antagonism of several *Trichoderma* spp. against *Sclerotinia sclerotiorum* L. in tomato (*Lycopersicon esculentum* M.) hybrid Heinz 7155, where the biofungicide was applied by drip irrigation, which favored disease control and increased fruit yield. Charoenrak and Chamswarn (2016) applied *Trichoderma asperellum* S. L. & N. in pellet form to combat seed discoloration disease in rice (*Oryza sativa* L.) in Thailand, and found that their formulations increased plant height, number of stems, seed weight, and total yield compared to the untreated control; in addition, they reduced the severity of the disease in the plants.

It is necessary to consider that *Trichoderma* spp. are not only beneficial fungi, since, in edible fungi, such as mushrooms, they cause green mold disease (Aydoğdu, Kurbetli, Kitapçı, & Sülü, 2020). *Trichoderma viride* P. as a pathogen causes mortality in Austrian pine seedlings (Li Destri-Nicosia, Mosca, Mercurio, & Schena, 2015), while *Trichoderma brevicompactum* K. produces mycotoxins that cause harm in humans, namely vomiting and gastroenteritis (Yang, Yu, Tan, Liu, & Wu, 2017).

Isolation and culture

Because *Trichoderma* spp. are microorganisms that preferentially inhabit soil (Singh et al., 2014), to isolate them they can be recovered from soils with a high organic matter content. Samples are obtained from the soil at random, with two different ways of sampling: systematic or unsystematic. The first, with simple random or stratified random schemes, would be suitable for uncultivated land or plots and for extensive crops, while for crops in plots or tree plantations, zig-zag, staggered, X or grid schemes can be used. The latter would be used when there is no special design (Sadeghian, 2018).

To obtain a homogeneous sample from the site, several soil subsamples must be taken, which can be at ground level, at the neck of the plant, in the area or under the root; subsequently, the subsamples are mixed and a sample is extracted. For depth, the type of crop and the depth of its roots are taken into account. Procedures, tools and materials can be chosen according to the researcher's criteria (Acurio & España, 2017; Mendoza & Espinoza, 2017; Sadeghian, 2018). For *in vitro* culture, there are different methods, such as serial dilution, which favors spore isolation, and does not favor other fungi that grow rapidly as mycelium on soil particles (Karthikeyan, Jaleel, Lakshmanan, & Deiveekasundaram, 2008; Maniscalco & Dorta, 2015; Magalhães-de Abreu

plantas a través de la producción de ácidos orgánicos (como el ácido indolacético [auxinas], ácido giberélico [giberelinas], ácido glucónico, ácido fumárico y ácido cítrico), y disminuir el pH del suelo. Promueven la solubilización de los minerales como el fósforo, el hierro, el magnesio y el manganeso, que son vitales para su metabolismo (Sharma, Salwan, & Sharma, 2017). Como ejemplo, el tratamiento de semillas con *Trichoderma* spp. ha sido una técnica exitosa que asegura que la raíz sea colonizada, lo cual genera un beneficio a la planta (Xue et al., 2017).

Cabe señalar que no solo es importante el agente de biocontrol utilizado, sino también la forma en que se aplica. Alves-de Aguiar, Gomes-da Cunha, y Lobo (2014) expusieron el antagonismo de varias especies de *Trichoderma* en contra de *Sclerotinia sclerotiorum* L. en tomate (*Lycopersicon esculentum* M.) híbrido Heinz 7155, en donde se aplicó el biofungicida mediante riego por goteo, con lo cual se favoreció el control de la enfermedad y el aumento del rendimiento de los frutos. Charoenrak y Chamswarn (2016) aplicaron *Trichoderma asperellum* S. L. & N. en forma de pellets para combatir la enfermedad de decoloración de la semilla de arroz (*Oryza sativa* L.) en Tailandia, y encontraron que sus formulaciones aumentaron la altura de la planta, número de tallos, peso de las semillas y el rendimiento total, en comparación con el control sin tratamiento; además, redujeron la severidad de la enfermedad en las plantas.

Es necesario considerar que *Trichoderma* spp. no son solo hongos benéficos, ya que, en los hongos comestibles, como las setas y los champiñones, causan la enfermedad del moho verde (Aydoğdu, Kurbetli, Kitapçı, & Sülü, 2020). *Trichoderma viride* P. como patógeno causa mortalidad en plántulas de pino austriaco (Li Destri-Nicosia, Mosca, Mercurio, & Schena, 2015), mientras que *Trichoderma brevicompactum* K. produce micotoxinas que causan daño en humanos, provocando vómitos y gastroenteritis (Yang, Yu, Tan, Liu, & Wu, 2017).

Aislamiento y cultivo

Debido a que *Trichoderma* spp. son microorganismos que habitan preferentemente en el suelo (Singh et al., 2014), para aislarlos se pueden recuperar de suelos con alto contenido de materia orgánica. Las muestras se obtienen de suelo al azar, con dos diferentes formas de muestreo: sistemática o asistemática. La primera, con los esquemas aleatorio simple o el aleatorio estratificado, sería la adecuada para terrenos o parcelas no cultivadas y para cultivos extensivos, mientras que, para cultivos en parcelas o plantaciones de árboles, se pueden utilizar los esquemas de zig-zag, tresbolillo, en X o en cuadrícula.

& Heinrich, 2022). For bacterial growth inhibition, an antimicrobial agent is added to the culture, such as 0.025 mg·mL⁻¹ chloramphenicol (Sigma) (Vulgarin-Martínez, 2006; López-López et al., 2023).

Morphological characteristics

Macroscopic characterization is performed by observation with the naked eye or with the aid of a stereoscope, and taxonomic keys are used for their description, such as those of Barnett and Hunter (1972), and Samuels and Hebbar (2015). Visual morphology would be the color of the colony (green with different intensities according to the species, white or yellow), the cottony texture or not of the mycelium, the formation of two or more concentric rings constituted by green pigmented conidia, and the diameter of the colony.

Microscopic characteristics are determined using optical microscopy, considering the taxonomic keys of Barnett and Hunter (1972), Gams and Bissett (1998), and Samuels and Ismaiel (2011) that define them, such as their hyaline and septate hyphae, the length and type of branching of their conidiophores, the shape, size, arrangement and number of phialides, and the shape, texture and dimension of conidia, as well as of their chlamydospores. Waghunde, Shelake, and Sabalpara (2016) state that the genus *Trichoderma* has about 200 species and that the strains appear very similar in terms of the color and texture of their mycelium, with or without concentric rings in two or more numbers, and their green color in different shades.

Molecular identification

Trichoderma species were identified considering morphological and physiological differences with the established taxonomy. However, this identification is not totally satisfactory, since the plasticity of the morphological characteristics in *Trichoderma* species is not sufficient to make an accurate taxonomic diagnosis. Therefore, for accurate identification, it is necessary to use molecular analyses (Hermosa, Viterbo, Chet, & Monte, 2012), as shown in Table 1.

Molecular biology is a scientific discipline that studies living beings at the molecular level. For the *Trichoderma* fungus, a sample of the mycelium is used to check for certain genes, proteins, or other molecules that specifically identify the species of the genus. The fungal constant is based on DNA sequencing, but also on the use of various gene markers that are used for correct molecular identification (Xu, 2016).

Fungi of the genus *Trichoderma* can be molecularly identified by the internal transcribed spacer (ITS) region's elongation factor, also called ribosomal DNA oligonucleotides. However, *Trichoderma* forms species

La segunda forma se usaría cuando no se tiene un diseño especial (Sadeghian, 2018).

Para obtener una muestra homogénea del sitio, se deben tomar varias submuestras del suelo, las cuales pueden ser a ras de suelo, a cuello de la planta, en el área o debajo de la raíz; posteriormente, las submuestras se mezclan y se extrae una muestra. Para la profundidad, se toma en cuenta el tipo de cultivo y profundidad de sus raíces. Los procedimientos, herramientas y materiales se pueden elegir de acuerdo con el criterio del investigador (Acurio & España, 2017; Mendoza & Espinoza, 2017; Sadeghian, 2018). Para el cultivo *in vitro*, existen diferentes métodos, como el de dilución en serie, el cual favorece el aislamiento de esporas, y no favorece a otros hongos que crecen con celeridad como micelio en las partículas del suelo (Karthikeyan, Jaleel, Lakshmanan, & Deiveekasundaram, 2008; Maniscalco & Dorta, 2015; Magalhães-de Abreu & Heinrich, 2022). Para la inhibición de crecimiento bacteriano, se adiciona un agente antimicrobiano al cultivo, como 0.025 mg·mL⁻¹ de cloranfenicol (Sigma) (Vulgarin-Martínez, 2006; López-López et al., 2023).

Características morfológicas




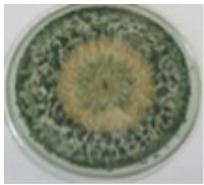
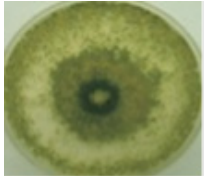
La caracterización macroscópica se realiza mediante la observación a simple vista o con la ayuda de un estereoscopio, y se utilizan claves o llaves taxonómicas para su descripción, como las de Barnett y Hunter (1972), y Samuels y Hebbar (2015). La morfología visual sería el color de la colonia (verde con diferentes intensidades de acuerdo con la especie, blancas o amarillas), la textura algodonosa o no del micelio, la formación de dos o más anillos concéntricos constituidos por conidios de pigmentación verde y el diámetro de la colonia.

Las características microscópicas se determinan bajo microscopio óptico, considerando las claves taxonómicas de Barnett y Hunter (1972), Gams y Bissett (1998), y Samuels e Ismaiel (2011) que las definen, como sus hifas hialinas y septadas, la longitud y tipo de ramificación de sus conidióforos, forma, tamaño, disposición y número de fiálides, la forma, textura y dimensión de conidios, así como de sus clamidosporas. Waghunde, Shelake, y Sabalpara (2016) afirman que el género *Trichoderma* tiene alrededor de 200 especies, y que las cepas se muestran con una apariencia muy similar en el color y textura de su micelio, con o sin anillos concéntricos en dos o más números, y su color verde en distintas tonalidades.

Identificación molecular

Las especies de *Trichoderma* se identificaron considerando las diferencias morfológicas y fisiológicas con la taxonomía establecida. Sin embargo, esta identificación no es

Table 1. Morphological and molecular identification of *Trichoderma* strains isolated from different regions and crops.
Cuadro 1. Identificación morfológica y molecular de cepas de *Trichoderma* aisladas de diferentes regiones y cultivos.

Strain/Cepa	Identification/ Identificación		Origen and crop/ Origen y cultivo	Accession no./ Núm. de accesión	Reference/ Referencia
	Morphological/ Morfológica	Molecular/ Molecular			
	<i>Trichoderma harzianum</i> R.	<i>Trichoderma asperellum</i> S. L. & N.	Chihuahua, Mx. <i>Capsicum annuum</i>	EU598544.1	Guigón-López et al. (2010)
	<i>Trichoderma viride</i> P.	<i>Trichoderma asperellum</i> S. L. & N.	Guerrero, Mx. <i>Mangifera indica</i>	GU198303.1	Guigón-López et al. (2010)
	<i>Trichoderma</i> spp.	<i>Trichoderma asperellum</i> S. L. & N.	Sinaloa, Mx. <i>Solanum tuberosum</i>	AY380912	Matas-Baca et al. (2022)
	<i>Trichoderma asperellum</i> S. L. & N.	<i>Trichoderma asperellum</i> Q1 S. L. & N.	China <i>Cucumis sativus</i>	HQ293149	Qi & Zhao (2012)
	<i>Trichoderma</i> spp.	<i>Trichoderma longibrachiatum</i> R.	Colima, Mx. <i>Mangifera indica</i>	EU401572.1	Guigón-López et al. (2010)

complexes, which increases the importance of obtaining correct identification; for this, the translation elongation factor encoding gene (TEF1- α) or the RNA polymerase II subunit (RPB2) is also sequenced (RPB2) (Gu, Wang, Sun, Wu, & Sun, 2020). Also, genetic distances between species can be measured using inter-simple sequence repeats or ISSRs, which have been shown to be useful for defining genetic relationships between *Trichoderma* strains. This is important to discover diversity, not only between species but also within species (Umaña-Castro, Orozco-Cayasso, Umaña-Castro, & Molina-Bravo, 2019). Today, laboratory methods and techniques for molecular identification are performed as a routine procedure in almost all phytosanitary diagnostic laboratories.

Genomic DNA extraction

This technique consists of isolating DNA molecules from fungal tissues, and is based on their physicochemical

totalmente satisfactorias, ya que la plasticidad de las características morfológicas en las especies de *Trichoderma* no es suficiente para hacer un diagnóstico taxonómico preciso. Por ello, para su identificación exacta es necesario utilizar los análisis moleculares (Hermosa, Viterbo, Chet, & Monte, 2012), como se observa en el Cuadro 1.

La Biología Molecular es una disciplina científica que estudia a los seres vivos a nivel molecular. Para el hongo *Trichoderma*, se utiliza una muestra del micelio para verificar si hay ciertos genes, proteínas u otras moléculas que identifiquen específicamente las especies del género. La constante fúngica está basada en la secuenciación del ADN, pero también en el uso de variados marcadores génicos que se utilizan para una identificación molecular correcta (Xu, 2016).

Los hongos del género *Trichoderma* se pueden identificar molecularmente mediante el factor de elongación de la

characteristics to precipitate their DNA (Lázaro-Silva, de Mattos, Castro, Alves, & Amorim, 2015). The genomic DNA of each strain is extracted from fresh mycelium, which is generally grown in a culture medium such as PDA (potato, dextrose and agar); after its growth, various techniques for its extraction are carried out, such as those described by Rajendrakumar et al. (2006), Zhang, Zhang, Liu, Wen, and Wang (2010), Hernández-Domínguez et al. (2019), Morales, Lino, Ortega, and Castellanos (2020), Küpper, Steiner, and Kortekamp (2022), and Barboza-García, Pérez-Cordero, and Anaya-Chamorro (2022), among others.

DNA amplification

With the polymerase chain reaction (PCR) technique in a thermal cycler, DNA sequences are amplified for identification. This technique is a simple and fast way to obtain millions of copies of the DNA present in biological samples (Mas et al., 2016). To amplify the ITS region of the DNA sample, gene fragments TS4 and ITS5 can be used (White, Bruns Lee, & Taylor, 1990); for the translation elongation factor 1- α (TEF1- α), fragments EF1-728F and TEF1LLerev can be used, and for RNA polymerase II Subunit B (RPB2) genes, fragments RPB2-5F and RPB2-7R can be used (Gu et al., 2020). Subsequently, to separate and observe the DNA or RNA molecules from the products obtained in the amplification, the laboratory technique called electrophoresis is used, and depending on their size and the resolution we want to obtain, agarose or polyacrylamide gels can be used at different concentrations. Observation is made by means of an X-ray with the aid of an ethidium bromide solution, an ultraviolet light lamp or silver staining. The separation of the molecules (DNA, RNA or proteins) is carried out based on their size and electrical charge, depending on their concentration in base pairs (Fierro, 2014; Mas et al., 2016).

Amplified DNA sequencing

According to Márquez-Valdelamar, Serrato-Díaz, and Cerritos-Flores (2008), genome sequencing is performed using different methods and techniques to determine the order of the nucleotides in the amplified DNA. These are based on the fact that all living beings have a fundamental divergence between the molecules of their genetic material. The amplified products are visualized by horizontal electrophoresis in 2% agarose gels (Acuña, Yalta, & Veli, 2020) and separated in a genetic analyzer. The sequencing process ends with the analysis of results in an electropherogram that shows the sequences obtained.

Capillary electrophoresis (CE) is another method that consists of the separation of compounds by an electric field, but in a capillary usually made of fused silica with electrolytes. An electrical double layer is formed

región del espaciador transcrito interno (ITS, por sus siglas en inglés), también llamado oligonucleótidos del ADN ribosómico. No obstante, *Trichoderma* forma complejos de especies, lo cual aumenta la importancia de obtener una correcta identificación; para ello, también se secuencian el gen del factor de elongación de la traducción (TEF1- α) o la subunidad de ARN polimerasa II (RPB2) (Gu, Wang, Sun, Wu, & Sun, 2020). También, se pueden medir las distancias genéticas entre especies utilizando inter-secuencias simples repetidas o ISSR (*inter simple sequence repeat*), que han demostrado ser útiles para definir relaciones genéticas entre cepas de *Trichoderma*. Esto resulta importante para descubrir la diversidad, no solo entre especies sino también dentro de las especies (Umaña-Castro, Orozco-Cayasso, Umaña-Castro, & Molina-Bravo, 2019). Hoy en día, los métodos y técnicas de laboratorio para la identificación molecular se realizan como un procedimiento de rutina en casi todos los laboratorios de diagnóstico fitosanitario.

Extracción de ADN genómico

Esta técnica consiste en aislar moléculas de ADN de los tejidos del hongo, y se basa en sus características físico-químicas para precipitar su ADN (Lázaro-Silva, de Mattos, Castro, Alves, & Amorim, 2015). El ADN genómico de cada cepa se extrae del micelio fresco, el cual crece, generalmente, en un medio de cultivo como PDA (papa, dextrosa y agar); después de su crecimiento, se llevan a cabo variadas técnicas para su extracción, como las descritas por Rajendrakumar et al. (2006), Zhang, Zhang, Liu, Wen, y Wang (2010), Hernández-Domínguez et al. (2019), Morales, Lino, Ortega, y Castellanos (2020), Küpper, Steiner, y Kortekamp (2022), y Barboza-García, Pérez-Cordero, y Anaya-Chamorro (2022), entre otras.

Amplificación del ADN

Con la técnica de reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés) en un termociclador, se logran amplificar las secuencias de ADN para su identificación. Esta técnica es una forma simple y rápida de obtener millones de copias del ADN presente en muestras biológicas (Mas et al., 2016). Para amplificar la región ITS de la muestra de ADN, se pueden utilizar los fragmentos de genes ITS4 e ITS5 (White, Bruns Lee, & Taylor, 1990), para el factor de elongación de traducción 1- α (TEF1- α) se pueden emplear los fragmentos EF1-728F y TEF1LLerev, y para los genes de la Subunidad B del ARN polimerasa II (RPB2) se pueden usar los fragmentos RPB2-5F y RPB2-7R (Gu et al., 2020). Posteriormente, para separar y observar las moléculas de ADN o ARN de los productos obtenidos en la amplificación, se usa la técnica de laboratorio llamada electroforesis, y dependiendo de su tamaño y de la resolución que queremos obtener, se pueden utilizar los geles de agarosa o poli(acrilamida) a distintas

in the capillary as part of the transport phenomenon that occurs inside it, and this offers greater versatility and efficiency, shorter analysis times, lower reagent consumption, and lower cost columns (Tomás-Barberán, 1995; Suntornsuk, 2002; Wu, Yu, Li, & Li, 2018).

Sequence comparison

Once the ITS or TEF1- α sequence of interest has been obtained, it is necessary to compare them with sequences available in electronic databases to determine their phylogenetic relationship; one of these databases is GenBank (gene bank) (Benson et al., 2018). The comparison is made in computer programs that use different search algorithms, where the most used is BLAST (basic local alignment search tool, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov>), with which it is possible to observe whether the fragment generated is already sequenced or is a new species (Márquez-Valdelamar et al., 2008).

Sequence registry

The purpose of this step is to create a right for the discovering researcher and to identify the microorganism found. Since 1995, molecular identification has been used in many lines of research, generating so many sequences that, in the early 1980s, it was necessary to create universal databases to safeguard the information and make it accessible to users. In 1982, GenBank was created, through the National Center for Biotechnology Information (NCBI), with more than 2,000 sequences and, at the beginning of 2011, this database consisted of more than 100,000,000 sequences (NCBI, 2021). According to GenBank version 250.0 documentation, as of June 2022 the database contained more than 2.45 billion sequences (GenBank, 2022).

Phylogenetic tree

A phylogenetic tree is a simple figure of biological associations connected by common descent, by major taxonomic groups or species. Most trees are created from DNA, RNA or protein molecular data (Gregory, 2008).

Phylogenetic or cladistic systematics is a branch of biology that detects, describes and explains the organization and origin of the diversity of organisms (Moritz & Hillis, 1996). This is based on molecular sequences, and has allowed grouping *Trichoderma* spp. within incomprehensible species, since they are genetically similar species, even though they are morphologically indistinct strains (Allende-Molar, Báez-Parra, Salazar-Villa, & Rojo-Báez, 2022).

Computer programs are needed to obtain a phylogenetic tree, then the forward and reverse sequences are checked and aligned in BioEdit 7.0.9 (Hall, 1999) and ClustalW (Thompson, Higgins, & Gibson, 1994) to obtain

concentraciones. La observación se realiza mediante una radiografía con ayuda de una solución de bromuro de etidio, una lámpara de luz ultravioleta o una tinción de plata. La separación de las moléculas (ADN, ARN o proteínas) se lleva a cabo en función de su tamaño y carga eléctrica, dependiendo de su concentración en pares de bases (Fierro, 2014; Mas et al., 2016).

Secuenciación del ADN amplificado

De acuerdo con Márquez-Valdelamar, Serrato-Díaz, y Cerritos-Flores (2008), la secuenciación del genoma se realiza a partir de diferentes métodos y técnicas para conocer el orden de los nucleótidos en el ADN amplificado. Estos se basan en que todos los seres vivos tienen una divergencia fundamental entre las moléculas de su material genético. Los productos amplificados se visualizan mediante electroforesis horizontal en geles de agarosa al 2 % (Acuña, Yalta, & Veli, 2020) y son separados en un analizador genético. El proceso de secuenciación finaliza con el análisis de resultados en un electroferograma que muestra las secuencias obtenidas.

La electroforesis capilar (EC) es otro método que consiste en la separación de los compuestos por un campo eléctrico, pero en un capilar, generalmente de sílica fundida con electrolitos. En el capilar se forma una doble capa eléctrica como parte del fenómeno de transporte que ocurre en su interior, y esto ofrece mayor versatilidad y eficiencia, menores tiempos de análisis, menor consumo de reactivos y columnas de menor costo (Tomás-Barberán, 1995; Suntornsuk, 2002; Wu, Yu, Li, & Li, 2018).

Comparación de secuencias

Una vez obtenida la secuencia ITS o TEF1- α de interés, es necesario compararlas con secuencias disponibles en bases de datos electrónicas para conocer su relación filogenética, una de estas bases de datos es la del GenBank (banco de genes) (Benson et al., 2018). La comparación se realiza en programas informáticos que utilizan diferentes algoritmos de búsqueda, donde el más utilizado es BLAST (herramienta básica de búsqueda de alineación local, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov>), con la cual se puede observar si el fragmento generado ya está secuenciado o es una nueva especie (Márquez-Valdelamar et al., 2008).

Registro de secuencias

Este paso tiene como propósito crear un derecho para el investigador descubridor e identificar el microorganismo encontrado. Desde 1995, la identificación molecular ha sido empleada en muchas líneas de investigación, con lo cual se han generado tantas secuencias que, a principios de los años ochenta, fue necesario crear bases de datos universales para salvaguardar la información

a consensus sequence, then the sequences are analyzed with PAUP 4.0-10 (Swofford, 1998), the Neighbor Joining method (Saitou & Nei, 1987) and Felsenstein's Bootstrap (1985), and finally they are passed to the FigTree 1.4.3 program (Rambaut, 2016) to edit the dendrogram, which is the basis for the analysis of behavioral and ecological biogeographic patterns in the evolutionary framework of the species (Espinosa-de los Monteros, 2003). In phylogenetic tree analysis, Bayesian inference is an intuitive and non-deductive tool, which focuses on the confidence of the observations for decision-making on the validity of its results, that is, the proximity between clades in the dendrogram, which can define the closest identification to the species studied (Rendón-Macías, Riojas-Garza, Contreras-Estrada, & Martínez-Ezquerro, 2018).

Antagonistic modes of action

Fungi of the genus *Trichoderma* provide mechanisms for plant protection in two ways: 1) directly, when they exert mycoparasitism, antibiosis, and competition for space and nutrients on pathogens, and 2) indirectly, when the fungus induces an increase in plant protection systems so that plants can defend themselves against pathogens (Guzmán-Guzmán et al., 2023).

Parasitism

Parasitism constitutes a mechanism for inhibiting the growth of phytopathogens, in which the parasite provides itself with nutrients when it kills its prey, although it does not always eliminate the pathogen (Guzmán-Guzmán et al., 2023). One of the most important aspects of the genus *Trichoderma* is that all species have a great ability to parasitize and feed on phytopathogenic fungi, which is also known as mycoparasitism (Druzhinina et al., 2018; Harwoko et al., 2021). Parasitism is one of the main mechanisms involved in the antagonism of *Trichoderma* as a biocontrol agent. This complex process includes sequential events involving the cycle of fungal strain recognition by *Trichoderma* spp. First, it coils around the phytopathogen, then penetrates and feeds on it, and, finally, causes its death (Rajesh, Rahul, & Ambalal, 2016). Genome comparison of some *Trichoderma* species showed that a large portion of their genes encode parasitic action, suggesting that this is a common practice of that genus (Guzmán-Guzmán et al., 2023).

Parasitism begins in the rhizosphere of plants, where biocontrol is fundamental to preventing plant infection. First, recognition occurs between *Trichoderma* spp. and the pathogen, which is guided by the production of oligochitins and lectins as sensor molecules of *Trichoderma* spp. to carbohydrates in the pathogen's

y hacerla accesible a los usuarios. En 1982, se creó el GenBank, a través del Centro Nacional de Información Biotecnológica (NCBI, por sus siglas en inglés), con más de 2,000 secuencias y, a principios de 2011, esta base de datos constaba con más de 100,000,000 secuencias (NCBI, 2021). De acuerdo con la documentación de la versión 250.0 del GenBank, en junio de 2022 la base de datos contenía más de 2,450 millones de secuencias (GenBank, 2022).

Árbol filogenético

Un árbol filogenético es una figura simple de asociaciones biológicas conectadas por una descendencia común, por grandes grupos taxonómicos o especies. La mayoría de los árboles se crean a partir de datos moleculares de ADN, ARN o proteínas (Gregory, 2008).

La sistemática filogenética o cladística es una rama de la biología que detecta, describe y explica la organización y origen en la diversidad de organismos (Moritz & Hillis, 1996). Esta se basa en secuencias moleculares, y han permitido agrupar a *Trichoderma* spp. dentro de especies no comprensibles, ya que son especies genéticamente similares, aunque sean cepas morfológicamente indistintas (Allende-Molar, Báez-Parra, Salazar-Villa, & Rojo-Báez, 2022).

Para la obtención de un árbol filogenético, se necesita de programas de computadora. Las secuencias directa e inversa se revisan y alinean en BioEdit 7.0.9 (Hall, 1999) y ClustalW (Thompson, Higgins, & Gibson, 1994) para obtener una secuencia de consenso, luego se analizan las secuencias con el PAUP 4.0-10 (Swofford, 1998), el método de unión de vecinos (Neighbor Joining) (Saitou & Nei, 1987) y el Bootstrap de Felsenstein (1985), y finalmente se pasan al programa FigTree 1.4.3 (Rambaut, 2016) para editar el dendrograma, que es la base para el análisis de patrones biogeográficos de comportamiento y ecológicos en el marco evolutivo de las especies (Espinosa-de los Monteros, 2003). En el análisis del árbol filogenético, la inferencia bayesiana es una herramienta intuitiva y no deductiva, que se enfoca en la confianza de las observaciones para la toma de decisiones en la validez de sus resultados; es decir, la proximidad entre los clados del dendrograma, lo cual puede definir la identificación más próxima a la especie estudiada (Rendón-Macías, Riojas-Garza, Contreras-Estrada, & Martínez-Ezquerro, 2018).

Modos de acción antagónica

Los hongos del género *Trichoderma* proveen mecanismos para la protección vegetal que pueden ser de dos maneras: 1) directamente, cuando estos ejercen sobre los patógenos el micoparasitismo, la antibiosis, y la competencia por espacio y nutrientes, y 2) indirectamente, cuando el

cell wall. Prior to connecting with their host, various protease genes and oligopeptide transporters are expressed. Subsequently, *Trichoderma* coils around the body or hyphae of the pathogen; then, at the ends of its hyphae, guided by a protein (hydrophobin), structures called appressoria are formed, with which the antagonist penetrates the cell wall of the phytopathogen and, together with its hyphae called haustoria and the production of enzymes (such as cellulases, hemicellulases, chitinases, proteases and -1,3-glucanases, among other secondary metabolites essential for parasitism), it gives way to nutrient uptake (Bhat, 2017; Guzmán-Guzmán et al., 2023).

Trichoderma species not only parasitize fungi, but also root-knot nematodes and their eggs (Heidari & Olia, 2016). Hosts also generate reactive oxygen species and other metabolites in response to attack, while *Trichoderma*, in turn, activates genes involved in a detoxification response (Fang, Li, Zhao, & Zhao, 2021).

Antibiosis

Antibiosis is the process that involves the production and excretion of secondary metabolites called antibiotics, which are substances with cytotoxic activity, low molecular weight, or diffusible compounds, which interact and can limit or inhibit the growth of phytopathogenic microorganisms. This expression given by encoding genes increases when pathogens and plant compounds exert a signaling effect with the biocontrol agent (Dou et al., 2020; Alfiky & Weisskopf, 2021; Mukhopadhyay & Kumar, 2020). Low molecular weight diffusible compounds (which are secondary metabolites of antagonistic *Trichoderma* fungi) interact with, arrest growth or kill phytopathogenic hosts (Masi, Nocera, Reveglia, Cimmino, & Evidente, 2018). It is estimated that *Trichoderma* spp. are capable of biosynthesizing more than a thousand secondary metabolites (Zhang et al., 2021).

In 1932, Weindling isolated the first secondary metabolite obtained from *Trichoderma lignorum* (*T. viride*), a crystalline compound, antagonistic to other fungi, which was named glyotoxin, as well as another fungistatic compound named viridin with fungal activity. These metabolites are used in the biocontrol of phytopathogens (Mesa-Vanegas, Marín, & Calle-Osorno, 2019). Some *Trichoderma* species produce amino acids, such as α -aminoisobutyric acid ($C_4H_9NO_2$), as an acetylated polypeptide antibiotic at its N-terminus and with an aminoalcohol at its C-terminus (Ramachander-Turaga, 2020). *T. virens* species produce trichodermamids, and *T. koningii*, koningininas, *T. harzianum* and *T. virens* synthesize azaphylones, harzianopyridone, harzianic acid and volatile terpenes, and different *Trichoderma*

hongo induce al aumento de los sistemas de protección en las plantas para que estas se puedan defender de sus patógenos (Guzmán-Guzmán et al., 2023).

Parasitismo

El parasitismo constituye un mecanismo de inhibición de crecimiento de fitopatógenos, en el cual el parásito se provee de nutrientes cuando mata a sus presas, aunque no siempre elimina al patógeno (Guzmán-Guzmán et al., 2023). Uno de aspectos más importantes del género *Trichoderma* es que todas las especies tienen una gran capacidad para parasitar y alimentarse de hongos fitopatógenos, lo que también se conoce como micoparasitismo (Druzhinina et al., 2018; Harwoko et al., 2021). El parasitismo es uno de los principales mecanismos involucrados en el antagonismo de *Trichoderma* como agente de biocontrol. Este proceso complejo incluye eventos secuenciales que involucran el ciclo de reconocimiento de la cepa fúngica por parte de *Trichoderma* spp. Primero, enrolla al fitopatógeno, después penetra al patógeno, se alimenta de él y, finalmente, provoca su muerte (Rajesh, Rahul, & Ambalal, 2016). En la comparación del genoma de algunas especies de *Trichoderma* se observó que gran parte de sus genes codifican acción parasitaria, lo cual insinúa que esta es una práctica común de dicho género (Guzmán-Guzmán et al., 2023).

El parasitismo inicia en la rizosfera de las plantas, en donde el biocontrol es primordial para prevenir la infección de las plantas. Primero ocurre el reconocimiento entre *Trichoderma* spp. y el patógeno, el cual es guiado por la producción de oligoquitinas y de lectinas como moléculas sensoras de *Trichoderma* spp. a los carbohidratos de la pared celular del patógeno. Previo a la conexión con su hospedero, se expresan diversos genes de proteasas y transportadores de oligopéptidos. Posteriormente, *Trichoderma* se enrolla alrededor del cuerpo o las hifas del patógeno; luego, en los extremos de sus hifas, guiados por una proteína (la hidrofobina), se forman estructuras llamadas apresorios, con los cuales el antagonista penetra la pared celular del fitopatógeno y, junto con sus hifas llamadas haustorios y la producción de enzimas (como las celulases, hemicelulasas, quitinasas, proteasas y -1,3-glucanasas, entre otros metabolitos secundarios esenciales para el parasitismo), se da paso a la absorción de nutrientes (Bhat, 2017; Guzmán-Guzmán et al., 2023).

Las especies de *Trichoderma* no solo parasitan hongos, también parasitan nematodos agalladores de raíz y sus huevos (Heidari & Olia, 2016). Los hospederos también generan especies reactivas de oxígeno y otros metabolitos como respuesta al ataque, mientras que *Trichoderma*, a su vez, activa genes que involucran una respuesta para desintoxicarse (Fang, Li, Zhao, & Zhao, 2021).

species produce a variety of hydrolytic enzymes and proteases, including exo- and endochitinases and exopeptidases, glucanases, lipases, and xylanases, which are involved in the biocontrol of pathogenic fungi with antifungal and antimicrobial action (Khan, Najeeb, Hussain, Xie, & Li, 2020; Sood et al., 2020). The best-known metabolite groups comprise non-ribosomal peptides such as peptaibiotics, siderophores, diketopiperazines, gliotoxin, glyoxin, gliovirin, polyketides, terpenes, pyrones, and isocyanate (Li, Li, & Zhang, 2019). Tables 2 and 3 show some secondary metabolites synthesized by *Trichoderma*.

Competition for space and nutrients

In the rhizosphere, due to the secretion of substances (such as organic acids, amino acids and saccharides, among others) by plants and soil, microorganisms compete for food to survive, and those with the best metabolic capacity are in places where resources are abundant (Igiehon & Babalola, 2018). Thus, *Trichoderma* species that produce antagonistic compounds (such as antibiotics or lytic enzymes), and exhibit rapid growth and colonization strategies, can occupy the best spaces in the rhizosphere, restrict the development of other phytopathogenic microorganisms, and aid plant growth (He et al., 2022). This strategy is also used by plant growth promoting bacteria (PGPB), which have the ability to fix nitrogen, solubilize minerals, synthesize siderophores, produce auxins, gibberellins and cytokinins, manifest antagonistic activity against phytopathogens, and are efficient colonizers of the soil and rhizosphere for the benefit of plants; for this reason, it is important to carry out antagonism tests when selecting *Trichoderma* or PGPB biocontrol species to observe their synergy or rejection in relation to each other (Rodríguez et al., 2019; Aguilar-Benítez et al., 2020). The saprophytic character of *T. spp.* makes them useful

Antibiosis

Se conoce como antibiosis al proceso que implica la producción y excreción de metabolitos secundarios llamados antibióticos, que son sustancias con actividad citotóxica, de bajo peso molecular o compuestos difusibles, las cuales interactúan y pueden limitar o inhibir el crecimiento de microorganismos fitopatógenos. Esta expresión dada por genes codificadores incrementa cuando los patógenos y los compuestos de las plantas ejercen un efecto de señalización con el agente de biocontrol (Dou et al., 2020; Alfiky & Weisskopf, 2021; Mukhopadhyay & Kumar, 2020). Los compuestos difusibles de bajo peso molecular (que son metabolitos secundarios de los hongos antagonistas *Trichoderma*) interactúan, detienen el crecimiento o matan a los hospederos fitopatógenos (Masi, Nocera, Reveglia, Cimmino, & Evidente, 2018). Se estima que *Trichoderma spp.* son capaces de biosintetizar más de mil metabolitos secundarios (Zhang et al., 2021).

En 1932, Weindling aisló el primer metabolito secundario obtenido de *Trichoderma lignorum* (*T. viride*), un compuesto cristalino, antagónico a otros hongos, que se denominó gliotoxina, así como otro compuesto fungicida denominado viridina con actividad fúngica. Dichos metabolitos son utilizados en el biocontrol de fitopatógenos (Mesa-Vanegas, Marín, & Calle-Osorno, 2019). Algunas especies de *Trichoderma spp.* producen aminoácidos, como el ácido α -aminoisobutírico ($C_4H_9NO_2$), como antibiótico polipeptídico acetilado en su terminal N y con aminoalcohol en su terminal C (Ramachander-Turaga, 2020). Las especies de *T. virens* producen tricodermamidas, y *T. koningii*, koningininas, *T. harzianum* y *T. virens* sintetizan azafilonas, harzianopiridona, ácido harziánico y terpenos volátiles, y diferentes especies de *Trichoderma* producen variadas enzimas hidrolíticas y proteasas, entre las que

Table 2. Secondary metabolites produced by *Trichoderma* fungi with antimicrobial activity and their hosts.

Cuadro 2. Metabolitos secundarios producidos por los hongos *Trichoderma* con actividad antimicrobiana y sus hospederos.

Species/Especies	Class / Metabolite / Clase / Metabolito	Hosts/Hospederos	Reference/Referencia
<i>T. virens</i>	Epipolythiodioxopiperazines / Gliotoxin and gliovirins / Epipolitiiodioxopiperazines / Gliotoxina y gliovirinas	<i>Rhizoctonia solani</i> and <i>Pythium ultimum</i> / <i>Rhizoctonia solani</i> y <i>Pythium ultimum</i>	Patron et al. (2007)
<i>T. polysporum</i>	Polyketides / Antroquinonas / Policetideos / Antroquinonas	<i>Fusarium spp.</i> and <i>Fomes annosus</i> / <i>Fusarium spp.</i> y <i>Fomes annosus</i>	Ghisalberti (1998)

Table 2. Secondary metabolites produced by *Trichoderma* fungi with antimicrobial activity and their hosts. (cont.)Cuadro 2. Metabolitos secundarios producidos por los hongos *Trichoderma* con actividad antimicrobiana y sus hospederos. (cont.)

Species / Especies	Class / Metabolite / Clase / Metabolito	Hosts / Hospederos	Reference / Referencia
<i>T. harzianum</i> , <i>koningii</i> and <i>aureoviride</i> / <i>T. harzianum</i> , <i>koningii</i> y <i>aureoviride</i>	Polyketides / Konioginins / Policétidos / Koningininas	<i>Phytophthora cinnamomi</i> , <i>Pythium middletonii</i> , <i>Rhizoctonia</i> <i>solani</i> and <i>Fusarium oxysporum</i> / <i>Phytophthora cinnamomi</i> , <i>Pythium middletonii</i> , <i>Rhizoctonia</i> <i>solani</i> y <i>Fusarium oxysporum</i>	Lang et al. (2015)
<i>T. harzianum</i> , <i>viride</i> and <i>atroviride</i> / <i>T. harzianum</i> , <i>viride</i> y <i>atroviride</i>	Pyrones / 6-pentyl- α -pyrone / Pironas / 6-pentil- α -pirona	<i>Rhizoctonia solani</i> and <i>Fusarium moniliforme</i> / <i>Rhizoctonia solani</i> y <i>Fusarium moniliforme</i>	Buchenauer & El- Hasan (2009)
<i>T. harzianum</i> and <i>virens</i> / <i>T. harzianum</i> y <i>virens</i>	Pyrones / Massoilactone / Pironas / Massoillactona	<i>Rhizoctonia bataticola</i> and <i>Fusarium</i> / <i>Rhizoctonia bataticola</i> y <i>Fusarium</i>	Dubey, Tripathi, Dureja, & Grover (2011)
<i>T. virens</i> and <i>hamatum</i> / <i>T. virens</i> y <i>hamatum</i>	Terpenoids / Viridiol / Terpenoides / Viridiol	<i>Aspergillus</i> spp. and <i>Rhizoctonia solani</i> / <i>Aspergillus</i> spp. y <i>Rhizoctonia solani</i>	Kerekes & Wipf (2003)
<i>T. viride</i> and <i>virens</i> / <i>T. viride</i> y <i>virens</i>	Terpenoids / Viridine / Terpenoides / Viridina	<i>Fusarium caeruleum</i> , <i>Penicillium</i> <i>expansum</i> and <i>Aspergillus niger</i> / <i>Fusarium caeruleum</i> , <i>Penicillium</i> <i>expansum</i> y <i>Aspergillus niger</i>	Reino, Guerrero, Hernández- Galán, & Collado (2008)
<i>T. harzianum</i>	Hetrocyclic compounds / Harzianic acid / Compuestos hetrocíclicos / Ácido harziánico	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i> and <i>Rhizoctonia solani</i> / <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> y <i>Rhizoctonia solani</i>	Vinale et al. (2009)
<i>T. harzianum</i>	Hetrocyclic compound / Harzianopyridonone / Compuestos hetrocíclicos / Harzianopiridonona	<i>Botrytis cinerea</i> , <i>Pythium ultimum</i> and <i>Gaeumannomyces graminis</i> / <i>Botrytis cinerea</i> , <i>Pythium ultimum</i> y <i>Gaeumannomyces graminis</i>	Vinale et al. (2006)
<i>T. asperellum</i> and <i>viride</i> / <i>T. asperellum</i> y <i>viride</i>	Peptaibols / Trichotoxins / Peptaiboles / Trichotoxinas	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia</i> <i>coli</i> and <i>Artemia salina</i> / <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia</i> <i>coli</i> y <i>Artemia salina</i>	Ren et al. (2013)

Table 3. Secondary metabolites produced by *Trichoderma* fungi with antifungal, antimicrobial, bioinductive and growth inhibitory activity.**Cuadro 3. Metabolitos secundarios producidos por los hongos *Trichoderma* con actividad antifúngica, antimicrobiana, bioinductora e inhibidora de crecimiento.**

Species/Especies	Metabolite/Metabolito	Activity/Actividad	Reference/Referencia
<i>T. koningiopsis</i>	Trikoningin KB I	Antifungal/Antifúngico	McMullin, Renaud, Barasubiye, Sumarah, & David (2017)
<i>T. asperellum</i> cf44-2	Bisabolan-1,10,11-triol 12-nor-11-acetoxybisabolen-3,6,7-triol Dechlorotrichodenone C	Antibacterial Antibacterial and growth inhibitor/Antibacterial e inhibidor de crecimiento	Song, Miao, Fang, Yin, & Ji (2018)
<i>T. saturnisporum</i>	Saturnispol A, B, C, D, E, F, G and H	Antibacterial	Meng et al. (2018)
<i>T. harzianum</i> T4	2(5H)-furanone 6-pentyl-2H-pyran-2-one Palmitic acid/Ácido palmítico Stigmasterol/Estigmasterol δ -decanolactone Harzianopyridone	Antifungal and growth inhibitor / Antifúngico e inhibidor de crecimiento	Ahluwalia, Kumar, Rana, Sati, & Walia (2014)
<i>T. harzianum</i>	Cyclo-(R-Pro-Gly) p-hydroxyphenylethanol	Antibacterial Antifungal/Antifúngico	Li et al. (2019)
<i>T. longibrachiatum</i>	Sorbicillin/Sorbicilina Ergosterol peroxide/ Peróxido de ergosterol	Antibacterial	Ji, Ma, & Miao (2014)
<i>T. viridescens</i> TS0404	Ergokonin A	Antifungal/Antifúngico	
	α -phenylcinnamic acid	Antifungal/Antifúngico	Zhang & Zhang (2015)
<i>T. atroviride</i>	4H-1,3-dioxin-4-one-2,3,6-trimethyl	Antibacterial	Saravanakumar et al. (2019)
<i>T. atroviride</i> and <i>T. harzianum</i> / <i>T. atroviride</i> y <i>T. harzianum</i>	1,3-dione-5,5-dimethylcyclohexane	Antibacterial	Saravanakumar et al. (2019)
<i>T. atroviride</i> S361	Lignoren	Antibacterial	Kong et al. (2018)

in a wide variety of substrates to directly compete for nutrients (Hjeljord, Tronsmo, Harman, & Kubicek 1998). In soils rich in organic matter, this mechanism is less effective (Martínez, Infante, & Reyes, 2013). In addition, factors such as soil type, pH, temperature, and moisture must be considered to obtain satisfactory results in its application (Companiononi-González et al., 2019).

Resistance induction

Microorganisms associated with plants in symbiosis, such as *Trichoderma* spp. or rhizobacteria, can induce plant defense systems, which is called systemic acquired resistance (SAR), and by modifying root biochemistry during their symbiotic interaction it is called *Trichoderma* induced systemic resistance (TISR) and rhizobacteria induced systemic resistance (RISR). This also happens when plants are attacked by pathogens or suffer mechanical damage, since systems are activated that enable them to protect themselves against disease or physical damage (Ab Rahman, Singh, Pieterse, & Schenk, 2018; Kumar, Kumari, Hembram, Kandha, & Bindhani, 2019).

Trichoderma spp. produce different metabolites that are important as inducers of resistance to phytopathogens of the plants with which they interact. Some examples of these metabolites are glucanases, lipoxygenases, chitinases, peroxidases (PODs), polyphenol oxidases (PPOs) and xylanases, among other protein-like gene products and low molecular weight compounds produced due to enzymatic-hydrolytic degradation of fungal or plant cells.

se encuentran exo y endo quitinasas y exopeptidasas, glucanasas, lipasas, y xilanasas, las cuales intervienen en el biocontrol de hongos patógenos con acción antifúngica y antimicrobiana (Khan, Najeeb, Hussain, Xie, & Li, 2020; Sood et al., 2020). Los grupos de metabolitos más conocidos comprenden péptidos no ribosómicos como peptaibióticos, sideróforos, dicetopiperazinas, gliotoxina, gliovirina, policétidos, terpenos, pironas y metabolitos de isociana (Li, Li, & Zhang, 2019). En los Cuadros 2 y 3 se muestran algunos metabolitos secundarios sintetizados por *Trichoderma*.

Competencia por espacio y nutrientes

En la rizosfera, debido a la secreción de sustancias (como ácidos orgánicos, aminoácidos y sacáridos, entre otros) por parte de las plantas y el suelo, los microorganismos compiten por los alimentos para sobrevivir, y los que tienen mejor capacidad metabólica están en los lugares donde abundan los recursos (Igiehon & Babalola, 2018). De esta manera, las especies de *Trichoderma* que producen compuestos antagónicos (como antibióticos o enzimas líticas), y presentan estrategias de rápido crecimiento y colonización, pueden ocupar los mejores espacios en la rizosfera, restringir el desarrollo de otros microorganismos fitopatógenos y ayudar al crecimiento de las plantas (He et al., 2022). Esta estrategia también es ejercida por bacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPB), las cuales tienen la capacidad para fijar nitrógeno, solubilizar minerales, sintetizar sideróforos, producir auxinas, giberelinas y citoquininas, manifestar actividad antagónica contra fitopatógenos,

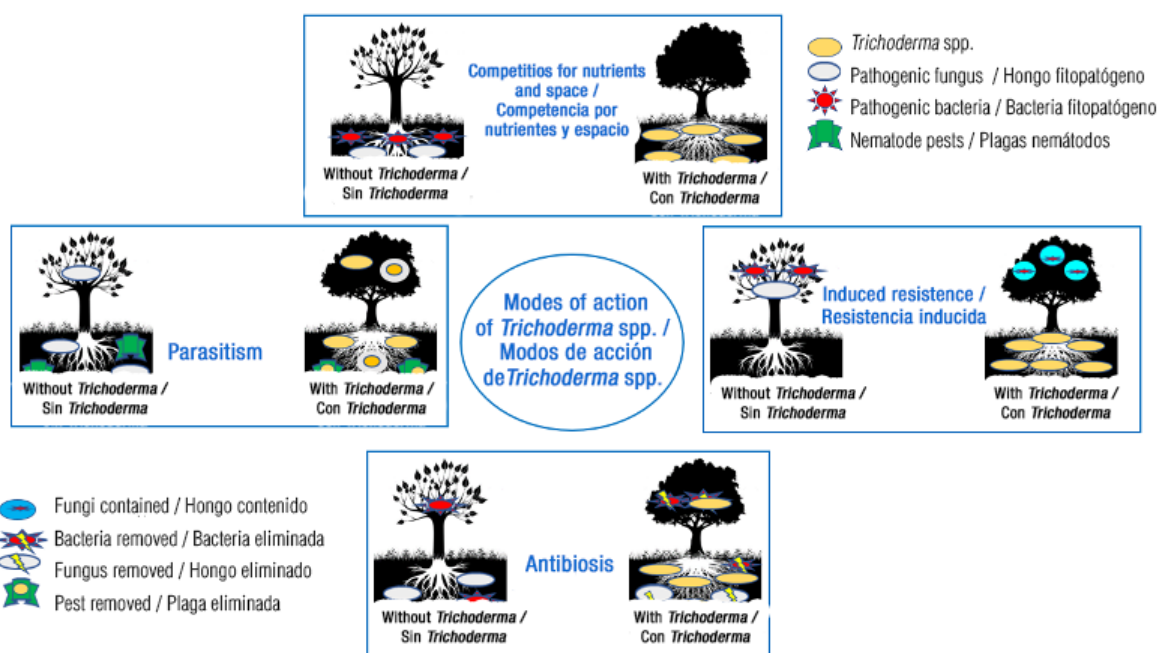


Figure 1. Mode of action of *Trichoderma* spp. against pathogens and pests, as well as their presence in plants and soil.
Figura 1. Forma de acción de *Trichoderma* spp. contra patógenos y plagas, así como su presencia en las plantas y el suelo.

These, together with the activation of transcription factors, make up the immune response that plants develop to biotic stress (Ahluwalia et al., 2014; Amorim et al., 2017).

TISR is very similar to RISR, in that both are regulated by the jasmonic acid/ethylene (JA/ET) signaling pathway. For example, *T. hamatum* strain Th23 can induce the expression of resistance proteins PR-1 and PR-7 in tomato plants following infection with tobacco mosaic virus (TMV) (Abdelkhalek, Al-Askar, Arishi, & Behiry, 2022; Risoli et al., 2022). Yedidia, Benhamou, and Chet (1999) observed increased resistance to phytopathogen attacks in cucumber (*Cucumis sativus* L.) roots inoculated with *T. harzianum* R. Likewise, *T. hamatum* TR 274 induces NPR1 gene activation in tomato plants during infection with TMV, which activates the SAR and RISR pathways with the production of enzymes (catalases, superoxide dismutases and PPO) and reduces hydrogen peroxide (H₂O₂) and malondialdehyde concentrations (Abdelkhalek et al., 2022).

T. harzianum R. induces chitinase expression in nightshades, making them tolerant to *Rhizoctonia solani* K. and *Botrytis cinerea* W. (Howell, 2003). *T. atroviride* synthesizes the volatile organic compound 6-pentyl- α -pyrone (6-PP), which contributes to better plant growth and regulates sugar transport (Esparza-Reynoso et al., 2021). This and other compounds synthesized by *Trichoderma* spp. are shown in Table 4. Figure 1 shows the modes of action of *Trichoderma* spp. against pathogens and pests, as well as their presence in plants and soil.

Trichoderma species consortia

Trichoderma spp. are important agricultural biocontrol microorganisms that are often used as effective components of fungicides, microbial and biofertilizers. However, most of these products are prepared with a single strain in monoculture, which significantly limits the biocontrol efficiency and stability of *Trichoderma* products. Therefore, research needs to be focused on the selection of consortia with *Trichoderma* strains for mixed cropping and to overcome the shortage of traditional *Trichoderma*-based biocontrol products (Hao et al., 2022).

Hao et al. (2022) measured the levels of antagonistic and growth-promoting activity in plants and in the germination of cucumber seeds infected with *Fusarium oxysporum*. The treatments were the combination of *T. asperellum*, *T. asperelloides*, *T. harzianum* and *T. asperellum* selected as a consortium in co-culture, versus monoculture of a single strain. It was observed that the consortia with multiple co-cultivated strains had better results and generated a greater amount of free amino acids than those of the monoculture. Also, the

son colonizadoras eficientes del suelo y la rizósfera en beneficio de las plantas; por ello, es importante realizar pruebas de antagonismo al seleccionar especies de biocontrol de *Trichoderma* o PGPB para observar su sinergia o rechazo entre sí (Rodríguez et al., 2019; Aguilar-Benítez et al., 2020). El carácter saprófito de *T. spp.* los hace útiles en una amplia variedad de sustratos para competir directamente por los nutrientes (Hjeljord, Tronsmo, Harman, & Kubicek 1998). En suelos ricos en materia orgánica, este mecanismo es menos efectivo (Martínez, Infante, & Reyes, 2013). Además, se deben considerar factores como el tipo de suelo, el pH, la temperatura y la humedad para obtener resultados satisfactorios en su aplicación (Companiononi-González et al., 2019).

Inducción de resistencia

Los microorganismos asociados a las plantas en simbiosis, como *Trichoderma* spp. o las rizobacterias, pueden inducir los sistemas de defensa de las plantas, lo cual se denomina resistencia sistémica adquirida (SAR), y al modificar la bioquímica radicular durante su interacción simbiótica se denomina resistencia sistémica inducida por *Trichoderma* (TISR) y resistencia sistémica inducida por rizobacterias (RISR). Esto también sucede cuando las plantas son atacadas por patógenos o sufren daños mecánicos, ya que se activan sistemas que les permiten protegerse contra las enfermedades o los daños físicos (Ab Rahman, Singh, Pieterse, & Schenk, 2018; Kumar, Kumari, Hembram, Kandha, & Bindhani, 2019).

Trichoderma spp. producen diferentes metabolitos que son importantes como inductores de resistencia a fitopatógenos de las plantas con las que interactúan. Algunos ejemplos de estos metabolitos son las glucanasas, lipoxigenasas, quitinasas, peroxidasas (POD), polifenol oxidasas (PPO) y xilanasas, entre otros productos génicos similares a proteínas y compuestos de bajo peso molecular producidos debido a la degradación enzimática hidrolítica de las células fúngicas o vegetales. Estos, junto con la activación de factores de transcripción, conforman la respuesta inmune que las plantas desarrollan ante el estrés biótico (Ahluwalia et al., 2014; Amorim et al., 2017).

La TISR es muy similar a la RISR, ya que ambas están reguladas por la vía de señalización del ácido jasmónico y el etileno (JA/ET). Por ejemplo, la cepa Th23 de *T. hamatum* puede inducir la expresión de proteínas de resistencia PR-1 y PR-7 en plantas de tomate tras la infección con el virus del mosaico del tabaco (TMV) (Abdelkhalek, Al-Askar, Arishi, & Behiry, 2022; Risoli et al., 2022). Yedidia, Benhamou, y Chet (1999) observaron un incremento en la resistencia a ataques de fitopatógenos en raíces de pepino (*Cucumis sativus* L.) inoculadas con *T. harzianum* R. Asimismo, *T. hamatum* TR 274 induce la activación del gen NPR1 en plantas de tomate durante la infección con TMV, lo cual activa

Table 4. Compounds synthesized by *Trichoderma* considered as phytohormones that induce, in plants, growth, development and resistance to pathogens.**Cuadro 4. Compuestos sintetizados por *Trichoderma* considerados como fitohormonas que inducen, en las plantas, el crecimiento, el desarrollo y la resistencia a los patógenos.**

Compound/ Compuesto	Function/ Función	Inductor/ Inductor	Reference/ Referencia
Abscisic acid/ Ácido abscísico	Reduces transpiration and stomatal opening by inducing an ABA receptor/ Reduce la transpiración y la apertura estomática al inducir un receptor ABA	<i>T. virens</i> P. and <i>T. atroviride</i> P./ <i>T. virens</i> P. y <i>T. atroviride</i> P.	Contreras-Cornejo, Macias-Rodríguez, Cortés-Penagos, & López-Bucio (2009)
3-gibberellic acid/ Ácido 3 giberélico	Promotes growth and lowers the ethylene level/ Promueve el crecimiento y la reducción del nivel de etileno	<i>T. spp.</i>	Hermosa et al. (2012)
Indoleacetic acid/ Ácido indolacético	Promotes plant growth and root development/ Promueve el crecimiento y el desarrollo radicular de las plantas	<i>T. virens</i> P.	Contreras et al. (2009)
Jasmonic acid/ Ácido jazmonico	Serves as a signaling agent for induced systemic resistance/ Funge como señalizador para la resistencia sistémica inducida	<i>T. asperellum</i> S. L. & N.	Yoshioka, Ichikawa, Naznin, Kogure, & Hyakumachi (2012)
Salicylic acid/ Ácido salicilico	Improves disease resistance through SAR induction/ Mejora la resistencia a enfermedades a través de la inducción de SAR	<i>T. atroviride</i> P.	Meng et al. (2019)
Ethylene/ Etileno	Improves tolerance to biotic and abiotic stress by regulating SA and JA levels/ Mejora la tolerancia al estrés biótico y abiótico mediante la regulación de los niveles de SA y JA	<i>T. atroviride</i> P.	Wang, Li, & Ecker (2002)
Glucanases/ Glucanasas	Repel herbivores and plants, and protect against pathogens through biosynthesis of phenylpropanoids (phytoalexins)/ Repelen herbívoros y plantas, y protegen contra patógenos mediante la biosíntesis de fenilpropanoides (fitoalexinas)	<i>T. spp.</i>	Ahluwalia et al. (2014)
6-pentyl- α -pyrone	Functions as a bio-based resistance inducer/ Funge como bioinductor de resistencia	<i>T. atroviride</i> UST2	Esparza-Reynoso et al. (2021)

same results were obtained in another study with potted cucumber seedlings, where it was found that metabolites from co-cultures with mixed strains of *Trichoderma* species were better at promoting growth and eliminating or containing the pathogen than the single-strain monoculture.

Trichoderma species registered in Mexico

Currently, it is estimated that the diversity of fungi in the world ranges from 2.2 to 3.8 million species (Calaça et al., 2022), and just over 375 species of *Trichoderma* are accepted and can be identified by molecular phylogeny (Cai & Druzhinina, 2021) In Mexico, there are 18 autochthonous *Trichoderma* species registered in the NCBI GenBank and the European Nucleotide Archive (ENA), with 113 strains distributed in 11 states of the Mexican Republic (NCBI, 2021) (Table 5). According to several studies, it is possible that there are other variants of a species, and even other species that have not been recorded. Within the studies carried out in Mexico, Allende-Molar et al. (2022) point out that 42 species of the genus *Trichoderma* have been identified based on morphological characteristics. Of that number, the authors state that 17 have been identified at the molecular level, including *T. asperellum* S. L. & N. and *T. harzianum* R., the latter being the most marketed in biological products.

Commercial products

In 80 years of use in Mexico, there are 230 biological control bioproducts produced by 40 companies that are registered with the Federal Commission for Protection against Sanitary Risks (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios; COFEPRIS), but some of them have a limited number of taxonomic groups in their active compounds, such as *Trichoderma* spp., where *T. harzianum*, *T. virens*, *T. asperellum* and *T. gamsii* stand out for their commercial agricultural use in Mexico (COFEPRIS, 2021). *T. harzianum* is the most marketed biological control species, and Sinaloa is the leading producer and marketer (Magalhães-de Abreu & Heinrich, 2022). Reports on biological control of phytopathogens at a national scale indicate limited availability of *Trichoderma* spp. as a biopesticide in pest control in Mexico (Córdova-Albores et al., 2021). Table 6 shows some *Trichoderma* spp.-based products available in Mexico, and Table 7 shows *Trichoderma* spp.-based products produced in different countries.

Conclusions and recommendations

The positive biological effects of the antagonistic fungus *Trichoderma* on plants have been proven, not only in the laboratory but also in the production of agricultural crops in greenhouses. Due to its efficient broad-spectrum antimicrobial activity, *Trichoderma* has established itself as

las vías SAR y RISR con la producción de enzimas (catalasas, superóxido dismutasas y PPO) y reduce las concentraciones del peróxido de hidrogeno (H₂O₂) y el malondialdehído (Abdelkhalek et al., 2022).

T. harzianum R. induce la expresión de quitinasa en solanáceas, y las hace tolerantes a *Rhizoctonia solani* K. y *Botrytis cinerea* W. (Howell, 2003). *T. atroviride* sintetiza el compuesto orgánico volátil 6-pentyl- α -pyrone (6-PP), el cual contribuye a un mejor crecimiento de las plantas y regula el transporte de azúcar (Esparza-Reynoso et al., 2021). Este y otros compuestos sintetizados por *Trichoderma* spp. se muestran en el Cuadro 4. En la Figura 1 se presentan los modos de acción de *Trichoderma* spp. contra patógenos y plagas, así como su presencia en las plantas y el suelo.

Consortios de especies de Trichoderma

Trichoderma spp. son importantes microorganismos de biocontrol agrícola que, a menudo, se utilizan como componentes efectivos de fungicidas, microbianos y biofertilizantes. Sin embargo, la mayoría de estos productos se preparan con una sola cepa en monocultivo, lo cual limita significativamente la eficiencia y la estabilidad del biocontrol de los productos de *Trichoderma*. Por ello, es necesario realizar investigaciones enfocadas en la selección de consorcios con cepas de *Trichoderma* para el cultivo mixto y para superar la escasez de productos de control biológico tradicionales a base de *Trichoderma* (Hao et al., 2022).

Hao et al. (2022) midieron los niveles de la actividad antagónica y promotora de crecimiento en plantas y en la germinación de semillas de pepino infectadas con *Fusarium oxysporum*. Los tratamientos fueron la combinación de *T. asperellum*, *T. asperelloides*, *T. harzianum* y *T. asperellum* seleccionadas como un consorcio en co-cultivo, contra el monocultivo de una sola cepa. Se observó que los consorcios con múltiples cepas co-cultivadas tuvieron mejores resultados y generaron una mayor cantidad de aminoácidos libres que los del monocultivo. También, se obtuvieron los mismos resultados en otro estudio en maceta con plántulas de pepino, en donde se encontró que los metabolitos de los cocultivos con cepas mixtas de especies de *Trichoderma* fueron mejores para promover el crecimiento y eliminar o contener al patógeno, que el monocultivo de una sola cepa.

Especies de Trichoderma registradas en México

Actualmente, se estima que la diversidad de hongos en el mundo varía de 2.2 a 3.8 millones de especies (Calaça et al., 2022), y poco más de 375 especies de *Trichoderma* son aceptadas y se pueden identificar mediante filogenia molecular (Cai & Druzhinina, 2021). En México, existen 18 especies autóctonas de *Trichoderma* registradas en el GenBank del NCBI y en el Archivo Europeo de Nucleótidos

Table 5. *Trichoderma* species isolated in Mexico and registered in the GenBank database at the National Center for Biotechnological Information (NCBI) and in the European Nucleotide Archive (ENA) 2022 (<https://eol.org/pages/6471602>).

Cuadro 5. Especies de *Trichoderma* aisladas en México y registradas en la base de datos del GenBank en el National Center for Biotechnological Information (NCBI) y en el European Nucleotide Archive (ENA) 2022 (<https://eol.org/pages/6471602>).

No. / Núm	Isolated species / Especie aislada	Identifier / Identificador	Quantity and Mexican state of origin / Cantidad y estado mexicano de origen
1	<i>Trichoderma avellanum</i> (Rogerson & S.T. Carey) (Jaklitsch & Voglmayr)	TU11509	One in Oaxaca /Uno en Oaxaca
2	<i>Trichoderma citrinoviride</i> Bissett	MF078653	One in Yucatán /Uno en Yucatán
3	<i>Trichoderma hamatum</i> (Bonord.) Bainier	MK791650	One in Veracruz/Uno en Veracruz
4	<i>Trichoderma intricatum</i> Samuels & Dodd	HQ833351	One in the State of Mexico /Uno en el Estado de México
5	<i>Trichoderma atroviride</i> P. Karst	KR607462	Two in Michoacán /Dos en Michoacán
6	<i>Trichoderma gamsii</i> Samuels & Druzhin	KR607467	Two in Michoacán / Dos en Michoacán
7	<i>Trichoderma ghanense</i> Yoshim Doi, Y. Abe & Sugiyama	MF078652	One in Quintana Roo and one in Yucatán/ Uno en Quintana Roo y uno en Yucatán
8	<i>Trichoderma longibrachiatum</i> Rifai	HQ833356	Two in the State of Mexico/Dos en el Estado de México
9	<i>Trichoderma paravidescens</i> Jaklitsch, Samuels & Voglmayr	JX144329	One in the State of Mexico and two in Tabasco / Uno Estado de México y dos en Tabasco
10	<i>Trichoderma tomentosum</i> Bissett	KR607480	Four in Michoacán/Cuatro en Michoacán
11	<i>Trichoderma koningii</i> Oudem	HQ833349	Two in the State of Mexico and two in Michoacán / Dos en el Estado de México y dos en Michoacán
12	<i>Trichoderma virens</i> J.H. Miller, Giddens & A.A. Foster	KT923710	One in Sinaloa and four in Yucatán/Uno en Sinaloa y cuatro en Yucatán
13	<i>Trichoderma koningiopsis</i> Samuels, C. Suárez & H.C. Evans	MK791649	One in Puebla, one in Yucatán, four in Jalisco and one in the State of Mexico /Uno en Puebla, uno en Yucatán, Cuatro en Jalisco y uno en el Estado de México
14	<i>Trichoderma viridescens</i> (A.S. Horne & H.S. Will.) (Jaklitsch & Samuels)	KR607474	Six in Michoacán /Seis en Michoacán
15	<i>Trichoderma asperellum</i> Samuels, Lieckf. & Nirenberg	KT923711	One in Yucatán, two in Sinaloa and four in Michoacán / Uno en Yucatán, dos en Sinaloa y cuatro en Michoacán
16	<i>Trichoderma viride</i> Pers	HQ833348	One in Colima, one in Veracruz and five in the State of Mexico/Uno en Colima, uno en Veracruz y cinco en Edo. de México
17	<i>Trichoderma eiji</i> C.S. Kim & N. Maek	KX953405	One in Nayarit and 23 in Veracruz/ Uno en Nayarit y 23 en Veracruz
18	<i>Trichoderma harzianum</i> Rifai	MF078650	28 in Michoacán, four in Yucatán and two in the State of Mexico /28 en Michoacán, cuatro en Yucatán y dos en el Estado de México

an internationally recognized biocontrol agent. However, field studies are required to determine the doses and timing for the application of *Trichoderma* species that can act in combination.

According to the analysis in this review, *Trichoderma* species are beneficial and essential to keep plants and soil in ideal conditions for agriculture. This paper describes, in a simplified manner, the ways to obtain, isolate and identify *Trichoderma* strains, including biocontrol mechanisms related to antibiosis, mycoparasitism, induced resistance in plants, and competition for space and nutrients.

Currently, there is a growing number of reports on *Trichoderma* species that evaluate their antagonistic activity and their use as a biocontrol method for combatting phytopathogens in commercially important crops.

(ENA, por sus siglas en inglés), con 113 cepas distribuidas en 11 estados de la República Mexicana (NCBI, 2021) (Cuadro 5). De acuerdo con diversas investigaciones, es posible que existan otras variantes de una especie, e incluso otras especies que no han sido registradas. Dentro de las investigaciones realizadas en México, Allende-Molar et al. (2022) señalan que de 42 especies del género *Trichoderma*, al identificarlas con base en características morfológicas mediante biología molecular se redujeron a 17, entre las cuales se encontraron *T. asperellum* S. L. & N. y *T. harzianum* R., siendo, esta última, la de mayor comercialización en productos biológicos.

Productos comerciales

En 80 años de uso en México, existen 230 bioproductos de control biológico producidos por 40 empresas que

Table 6. Commercial products made from *Trichoderma* available in Mexico.

Cuadro 6. Productos comerciales elaborados a base de *Trichoderma* disponibles en México.

Product / Species / Producto / Especie	Diseases / Pathogens / Enfermedades / Patógenos	Crops / Cultivos	Sources / Fuentes
TUSAL®/ <i>T. atroviride</i> T-11 <i>T. asperellum</i> T-25	Of the root and damping off / <i>Fusarium</i> spp. and <i>Rhizoctonia solani</i> / De raíz y damping off/ <i>Fusarium</i> spp. y <i>Rhizoctonia solani</i>	Tomato, peppers, cucurbits and beet / Tomate, pimiento, cucurbitáceas y remolacha	Timac Agro (2022)
ProSelectiv®/ <i>T. harzianum</i>	Of the root and damping off / <i>Macrophomina phaseolina</i> , <i>Phymatotrichum omnivorum</i> , <i>Armillaria</i> spp, <i>Phomopsis</i> spp., * <i>Botrytis</i> <i>cinerea</i> and <i>Nectria galligena</i> / De raíz y damping off / <i>Macrophomina phaseolina</i> , <i>Phymatotrichum</i> <i>omnivorum</i> , <i>Armillaria</i> spp, <i>Phomopsis</i> spp., * <i>Botrytis cinerea</i> y <i>Nectria galligena</i>	Cucurbits, grapevine, walnut, pea, banana, strawberry, brassicas, flowers, peach, nightshades and apple tree / Cucurbitáceas, vid, nogal, chícharo, plátano, fresas, brasicáceas, flores, durazno, solanáceas y manzano	Azul Natural (2021)
Don Jon® / <i>T. asperellum</i> ICC012 <i>T. gamsii</i> ICC080	Of the root, damping off and cut wounds / <i>Yesca</i> , * <i>Verticillium</i> spp., <i>Sclerotium rolfsii</i> , <i>Phytophthora</i> spp., <i>Thielaviopsis</i> spp., * <i>Nectria galligena</i> , <i>Rhizoctonia purpureum</i> and <i>Pythium</i> spp./ De raíz, damping off y heridas de corte / <i>Yesca</i> , * <i>Verticillium</i> spp., <i>Sclerotium rolfsii</i> , <i>Phytophthora</i> spp., <i>Thielaviopsis</i> spp., * <i>Nectria galligena</i> , <i>Rhizoctonia purpureum</i> y <i>Pythium</i> spp.	Fruit trees, forestry, strawberry, grapevine, celery, endive, artichoke, olive, carrot, ornamentals, eggplant, tomato and spinach / Árboles frutales, forestales, fresas, vid, apio, endibia, alcachofa, olivo, zanahoria, ornamentales, berenjena, frutillas, tomate y espinaca	Bayer (2021)
Funqui Q07®/ <i>T. viride</i> Q07	Of the root and damping off / <i>Phytophthora</i> spp., <i>Fusarium</i> spp., <i>Cylindrocladium</i> spp. and <i>Thielaviopsis</i> sp./ De raíz y damping off / <i>Phytophthora</i> spp., <i>Fusarium</i> spp., <i>Cylindrocladium</i> spp. y <i>Thielaviopsis</i> sp.	Tomato, eggplant, tobacco, tomatillo, peppers, agaves, potato, jalapeño and habanero / Tomate, berenjena, tabaco, tomatillo, pimiento, agaves, papa, jalapeño y habanero	Quimia (2022)

* Product applied to the foliage

* Aplicar producto al follaje

Table 6. Commercial products made from *Trichoderma* available in Mexico. (cont.)Cuadro 6. Productos comerciales elaborados a base de *Trichoderma* disponibles en México. (cont.)

Product / Species / Producto / Especie	Diseases / Pathogens / Enfermedades / Patógenos	Crops / Cultivos	Sources / Fuentes
Spectrum Trico-Bio® / <i>T. harzianum</i>	Of the root, damping off and neck rot / <i>Peronospora destructor</i> , <i>Phytophthora</i> <i>parasítica</i> , <i>Pseudocercospora opuntiae</i> , <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> , <i>Rhizoctonia</i> sp. and <i>Fusarium oxysporum</i> / De raíz, damping off y pudrición del cuello / <i>Peronospora destructor</i> , <i>Phytophthora parasítica</i> , <i>Pseudocercospora</i> <i>opuntiae</i> , <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> , <i>Rhizoctonia</i> sp. y <i>Fusarium oxysporum</i>	Tomato, nopal, raspberry, papaya, cucurbits, pineapple, strawberry, asparagus, tomatillo, garlic and habanero / Tomate, nopal, frambuesa, papaya, cucurbitáceas, piña, frutillas, pimiento, cebolla, berenjena, jalapeño, fresa, espárrago, tomatillo, ajo y habanero	PTI (2022)
RootShield Plus® / <i>T. harzianum</i> T-22 <i>T. virens</i> G41	Of the root and damping off / <i>Phytophthora</i> spp., <i>Pythium</i> spp., <i>Cylindrocladium</i> spp., <i>Fusarium</i> spp., <i>Rhizoctonia</i> spp. and <i>Thielaviopsis</i> spp. / De raíz y damping off / <i>Phytophthora</i> spp., <i>Pythium</i> spp., <i>Cylindrocladium</i> spp., <i>Fusarium</i> spp., <i>Rhizoctonia</i> spp. y <i>Thielaviopsis</i> spp.	Blueberry, raspberry, strawberry, eggplant, tomatillo, potato, peppers, tobacco, blackberry and tomato / Cucurbitáceas, solanáceas, cebolla, espárrago, fresa, mora, frambuesa y zarzamora	PHCa (2021)
Phc T22® / <i>T. harzianum</i> T-22 <i>T. harzianum</i> KRL-AG2	Prevents root pathogens in all types of climates and soils / <i>Pythium</i> spp., <i>Thielaviopsis</i> spp., <i>Rhizoctonia</i> spp., <i>Cylindrocladium</i> spp., <i>Fusarium</i> spp. and <i>Sclerotinia</i> / Previene patógenos radiculares para todo tipo de climas y suelos / <i>Pythium</i> spp., <i>Thielaviopsis</i> spp., <i>Rhizoctonia</i> spp., <i>Cylindrocladium</i> spp., <i>Fusarium</i> spp. y <i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Cucurbits, nightshades, onion, asparagus, strawberry, blackberry, raspberry and elmleaf blackberry / Cucurbitáceas, solanáceas, cebolla, espárrago, fresa, mora, frambuesa y zarzamora	PHCb (2021)
Trianum P® / <i>T. harzianum</i> T-22	Of the root and damping off / <i>Fusarium</i> spp., <i>Rhizoctonia</i> spp., <i>Sclerotinia</i> spp. and <i>Phytophthora</i> spp. / De raíz y damping off / <i>Fusarium</i> spp., <i>Rhizoctonia</i> spp., <i>Sclerotinia</i> spp. y <i>Phytophthora</i> spp.	Cereals, vegetables, grasses, arboriculture, perennial fruit trees and corn / Cereales, hortalizas, céspedes, arboricultura, frutales perennes y maíz	Koppert (2021)
Labrador® / <i>T. harzianum</i>	Of the root and neck rot / <i>Phytophthora</i> <i>cinnamomi</i> , <i>Phymatotrichopsis</i> <i>omnivora</i> , * <i>Verticillium</i> spp., <i>Sclerotinia</i> <i>sclerotiorum</i> , <i>Thielaviopsis</i> spp., <i>Pyrenochaeta Terrestris</i> , <i>Rhizoctonia</i> <i>solani</i> and <i>Cylindrocladium</i> spp. / De raíz y pudrición del cuello / <i>Phytophthora cinnamomi</i> , <i>Phymatotrichopsis</i> <i>omnivora</i> , * <i>Verticillium</i> spp., <i>Sclerotinia</i> <i>sclerotiorum</i> , <i>Thielaviopsis</i> spp., <i>Pyrenochaeta Terrestris</i> , <i>Rhizoctonia</i> <i>solani</i> y <i>Cylindrocladium</i> spp.	Walnut, avocado, onion, strawberry, berries, cucurbits and nightshades / Nuez, aguacate, cebolla, fresas, bayas, cucurbitáceas y solanáceas	Versa (2021)
Tricho-sin® / <i>T. harzianum</i> ABNTh 502	Of the root and damping off / <i>Colletotrichum</i> spp. and <i>Fusarium</i> spp. / De raíz y damping off / <i>Colletotrichum</i> spp. y <i>Fusarium</i> spp.	Mango, peppers, leek, grapevine, nightshades, kiwi, strawberry, onion, cucurbits and asparagus / Mangos, chiles, poro, vid, solanáceas, kiwi, frutillas, cebolla, cucurbitáceas y espárrago	Agrobionsa (2022)

* Product applied to the foliage

* Aplicar producto al follaje

Table 6. Commercial products made from *Trichoderma* available in Mexico. (cont.)Cuadro 6. Productos comerciales elaborados a base de *Trichoderma* disponibles en México. (cont.)

Product / Species / Producto / Especie	Diseases / Pathogens / Enfermedades / Patógenos	Crops / Cultivos	Sources / Fuentes
Biotricho-H. / <i>T. harzianum</i>	Of the root and damping off / <i>Fusarium</i> spp. and <i>Rhizoctonia</i> spp./ De raíz y damping off / <i>Fusarium</i> spp. y <i>Rhizoctonia</i> spp.	Cucurbits, nightshades, avocado, peppers / Mangos, chiles, poro, vid, solanáceas, kiwi, frutillas, cebolla, cucurbitáceas y espárrago	Sagana Agrobiológicos (2022)
Bioben / <i>T. harzianum</i>	Of the root and damping off / <i>Phytophthora</i> spp., <i>Rhizoctonia</i> spp., <i>Pythium</i> spp., <i>Sclerotinia</i> spp., <i>Sclerotium</i> spp., <i>Fusarium</i> spp. and <i>Verticillium</i> spp./ De raíz y damping off / <i>Phytophthora</i> spp., <i>Rhizoctonia</i> spp., <i>Pythium</i> spp., <i>Sclerotinia</i> spp., <i>Sclerotium</i> spp., <i>Fusarium</i> spp. y <i>Verticillium</i> spp.	Mango, peppers, cucurbits, nightshades / Mangos, chiles, cucurbitáceas, solanáceas	Innovación Agrícola (2022)

* Product applied to the foliage

* Aplicar producto al follaje

Table 7. Commercial products made from *Trichoderma* species from some countries.Cuadro 7. Productos comerciales elaborados a base de especies de *Trichoderma* de algunos países.

Product / Species / Producto / Especie	Diseases / Pathogens / Enfermedades / Patógenos	Crops / Cultivos	Reference / Referencia	Country / País
ECO-T® / <i>Trichoderma asperellum</i>	Root promoter / <i>Pythium</i> spp., <i>Rhizoctonia</i> spp., <i>Phytophthora</i> spp. and <i>Fusarium</i> / Promotor radicular / <i>Pythium</i> spp., <i>Rhizoctonia</i> spp., <i>Phytophthora</i> spp. y <i>Fusarium</i>	Vegetables and fruit trees / Hortalizas y frutales	Andermatt Madumbi (2022)	South Africa / Sudáfrica
TRICHODERMAX EC® / <i>Trichoderma asperellum</i>	Of the stem and root / <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> , <i>Fusarium solani</i> and <i>Rhizoctonia solani</i> / De tallo y raíz / <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> , <i>Fusarium solani</i> y <i>Rhizoctonia solani</i>	Bean and soybean / Frijol y soya	Agro Link (2022)	Brazil / Brasil
ECOHOPE® ECOHOPE-DRY® / <i>Trichoderma atroviride</i> and SKT-1 / <i>Trichoderma</i> <i>atroviride</i> y SKT-1	Of the foliage, stem and root / <i>Gibberella fujikuroi</i> , <i>Burkholderia plantarii</i> , <i>Burkholderia glumae</i> and <i>Acidovorax avenae</i> / De follaje, tallo y raíz / <i>Gibberella fujikuroi</i> , <i>Burkholderia plantarii</i> , <i>Burkholderia glumae</i> y <i>Acidovorax avenae</i>	Rice / Arroz	Kumiai Chemical Industry (2022)	Japan / Japón

Table 7. Commercial products made from *Trichoderma* species from some countries. (cont.)Cuadro 7. Productos comerciales elaborados a base de especies de *Trichoderma* de algunos países. (cont.)

Product / Species / Producto / Especie	Diseases / Pathogens / Enfermedades / Patógenos	Crops / Cultivos	Reference / Referencia	Country / País
AGRODERMA® / <i>Trichoderma harzianum</i>	Vascular (root and stem) / <i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Pythium</i> spp., <i>Phytophthora</i> spp., <i>Verticillium</i> spp., <i>Fusarium</i> spp., <i>Sclerotinia</i> spp. and <i>Sclerotium rolfsii</i> / Vasculares (raíz y tallo) / <i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Pythium</i> spp., <i>Phytophthora</i> spp., <i>Verticillium</i> spp., <i>Fusarium</i> spp., <i>Sclerotinia</i> spp. y <i>Sclerotium rolfsii</i>	Tomato, pepper, potato, eggplant and tobacco / Jitomate, chile, papa, berenjena y tabaco	Gründag International (2022)	Mexico / México
BIO-T® / <i>Trichoderma harzianum</i>	Overturning or damping off / <i>Rhizoctonia solani</i> and <i>Fusarium</i> spp. / Volcamiento o damping off / <i>Rhizoctonia solani</i> y <i>Fusarium</i> spp.	Rice / Arroz	P.L.A. Biológico (2022)	Colombia
BIOHARZ® / <i>Trichoderma harzianum</i>	Of the root or damping off / <i>Fusarium</i> , <i>Rhizoctonia</i> , <i>Pythium</i> , <i>Sclerotium</i> spp., <i>Verticillium</i> spp., <i>Alternaria</i> spp. and <i>Botrytis cinerea</i> / Volcamiento o damping off / <i>Fusarium</i> , <i>Rhizoctonia</i> , <i>Pythium</i> , <i>Sclerotium</i> spp., <i>Verticillium</i> spp., <i>Alternaria</i> spp. y <i>Botrytis cinerea</i>	Cereals, pulses, seeds, oilseeds, cotton, nightshades, potato, onion and coffee / Cereales, legumbres, semillas, oleaginosas, algodón, solanáceas, papa, cebolla y café	FARMERSSTOP (2022)	India
HULKGREEN® / <i>Trichoderma harzianum</i>	Of the root or damping off / <i>Rhizoctonia</i> , <i>Sclerotinia</i> , <i>Pythium</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Verticillium</i> , <i>Puccinia</i> , <i>Phytophthora</i> and <i>Peronospora</i> / De raíz o damping off / <i>Rhizoctonia</i> , <i>Sclerotinia</i> , <i>Pythium</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Verticillium</i> , <i>Puccinia</i> , <i>Phytophthora</i> y <i>Peronospora</i>	Vegetables and fruit trees / Hortalizas y frutales	Caltech S.A. (2022)	Argentina

Table 7. Commercial products made from *Trichoderma* species from some countries. (cont.)Cuadro 7. Productos comerciales elaborados a base de especies de *Trichoderma* de algunos países. (cont.)

Product / Species / Producto / Especie	Diseases / Pathogens / Enfermedades / Patógenos	Crops / Cultivos	Reference / Referencia	Country / País
LYCOMAX® / <i>Trichoderma harzianum</i>	Of the root or damping off / <i>Pythium</i> spp., <i>Phytophthora</i> spp., <i>Rhizoctonia</i> spp. and <i>Fusarium</i> spp./ De raíz o damping off / <i>Pythium</i> spp., <i>Phytophthora</i> spp., <i>Rhizoctonia</i> spp. y <i>Fusarium</i> spp.	Tubers and ornamentals / Tubérculos y ornamentales	Russell IPM. (2022)	United Kingdom / Reino Unido
NATUCONTROL® / <i>Trichoderma harzianum</i>	Of the root, stem and neck / <i>Phytophthora</i> <i>capsici</i> , <i>Fusarium</i> <i>oxysporum</i> and <i>Sclerotinia</i> spp./ De raíz, tallo y cuello / <i>Phytophthora capsici</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> y <i>Sclerotinia</i> spp.	Tomato, lettuce, avocado, strawberry, peanuts, legumes, jicama and soybean / Tomate, lechuga, aguacate, frutillas, cacahuate, legumbres, jícama y soya	Biokrone (2022)	USA / EUA
SOILGARD 12 G® / <i>Trichoderma virens</i> and <i>Gliocladium virens</i> GL-21 / <i>Trichoderma virens</i> y <i>Gliocladium virens</i> GL-21	Overturning / <i>Phytophthora capsici</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Sclerotinia</i> sp. and <i>Phytophthora cinnamomi</i> / Volcamiento / <i>Phytophthora capsici</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Sclerotinia</i> sp. y <i>Phytophthora cinnamomi</i>	Nightshades, cucurbits, ornamentals, lettuce, spinach / Solanáceas, cucurbitáceas, ornamentales, lechugas, espinacas	Certis (2022)	USA / EUA
ASTHA TV® / <i>Trichoderma viride</i>	Of the neck and root / <i>Rhizoctonia</i> <i>solani</i> , <i>Pythium</i> spp. and <i>Fusarium</i> spp./ De cuello y raíz / <i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Pythium</i> spp. y <i>Fusarium</i> spp.	Fruit trees, vegetables, turmeric and spices / Frutales, hortalizas, cúrcuma y especies	Lila Agrotech (2022)	India
CONTEGO TR® / <i>Trichoderma viride</i>	Of the root, seeds and defense inductor / <i>Rhizoctonia</i> , <i>Pythium</i> and <i>Armillaria</i> / De raíz semillas e inductor defensa / <i>Rhizoctonia</i> , <i>Pythium</i> y <i>Armillaria</i>	Fruit trees, vegetables, legumes and oilseeds / Frutales, hortalizas, legumbres y oleaginosas	Biological Solutions (2022)	New Zealand / Nueva Zelanda

Table 7. Commercial products made from *Trichoderma* species from some countries. (cont.)Cuadro 7. Productos comerciales elaborados a base de especies de *Trichoderma* de algunos países. (cont.)

Product / Species / Producto / Especie	Diseases / Pathogens / Enfermedades / Patógenos	Crops / Cultivos	Reference / Referencia	Country / País
FUNGISTOP® / <i>Trichoderma viride</i>	Of the root, stem and foliage / <i>Fusarium</i> spp., <i>Pythium</i> spp., <i>Alternaria</i> spp., <i>Verticillium</i> spp., <i>Erysiphe</i> spp., <i>Peronospora</i> spp., <i>Botrytis</i> spp. and <i>Helminthosporium</i> / De raíz, tallo y follaje / <i>Fusarium</i> spp., <i>Pythium</i> spp., <i>Alternaria</i> spp., <i>Verticillium</i> spp., <i>Erysiphe</i> spp., <i>Peronospora</i> spp., <i>Botrytis</i> spp. y <i>Helminthosporium</i>	Fruits, nightshades, cucurbits and berries / Frutas, solanáceas, cucurbitáceas y berries	Biona (2022)	Russia / Rusia
BIOSPARK® / <i>Trichoderma</i> spp.	Biofertilizer and growth promoter / <i>Phytophthora</i> spp. / Biofertilizante y promotor de crecimiento / <i>Phytophthora</i> spp.	Corn, rice, vegetables, mango, banana, sugarcane and pineapple / Maíz, arroz, hortalizas, mango, bananos, caña y piña	Biospark Corp. (2022)	Philippines / Filipinas
TRICODAMP® / <i>Trichoderma</i> spp.	Overturning or damping off / <i>Phytophthora</i> spp., <i>Rhizoctonia</i> spp. and <i>Pythium</i> spp. / Volcamiento o <i>damping</i> <i>off</i> / <i>Phytophthora</i> spp., <i>Rhizoctonia</i> spp. y <i>Pythium</i> spp.	Extensive crops, vegetables and fruit trees / Cultivos extensivos, hortalizas y frutales	Probiotec (2022)	Bolivia
VALERY PLUS® / <i>Trichoderma harzianum</i> and <i>Trichoderma viride</i> / <i>Trichoderma harzianum</i> y <i>Trichoderma viride</i>	Overturning or damping off / <i>Rhizoctonia</i> spp., <i>Botrytis cinerea</i> and <i>Phytophthora</i> spp. / Volcamiento o <i>damping</i> <i>off</i> / <i>Rhizoctonia</i> spp., <i>Botrytis cinerea</i> y <i>Phytophthora</i> spp.	Fruit trees and grapevine / Frutales y vid	Agrobioticos (2022)	Peru / Perú
NUTRI-LIFE TRICHO- SHIELD® / <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>T.</i> <i>lignorum</i> and <i>T. koningii</i> / <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>T. lignorum</i> y <i>T. koningii</i>	Plant growth promoter seeds and transplants / <i>Phytophthora</i> spp. / Promotor crecimiento de plantas semillas y trasplantes / <i>Phytophthora</i> spp.	Bulbs, cuttings, grafts and established crops / Bulbos, esquejes, injertos y cultivos establecidos	Nutri-Tech Solutions (2022)	Australia
3 TAEX® / <i>T. viride</i> , <i>T. harzianum</i> and <i>T. longibrachiatum</i> / <i>T. viride</i> , <i>T. harzianum</i> y <i>T. longibrachiatum</i>	Stem rot / <i>Chondrostereum</i> and <i>Heterobasidium</i> / Pudrición del tallo / <i>Chondrostereum</i> y <i>Heterobasidium</i>	Fruit trees, strawberry and <i>Pinus radiata</i> / Frutales, frutillas y <i>Pinus radiata</i>	Pinturas Renner Biotechnologies (2022)	Chile

In different regions of Mexico, and with the aim of promoting sustainable agriculture, various biopreparations based on a few species of *Trichoderma* are marketed, mainly *T. harzianum*, followed by *T. virens*, *T. asperellum* and *T. viride*.

It is important to emphasize that with the information provided in this review on the biocontrol of native *Trichoderma* species registered in Mexico, as well as the description of the action and availability of products based on *Trichoderma* spp., interest can be generated in their use by farmers, as well as new research alternatives with guidelines that contribute to the transfer of biocontrol knowledge. The foregoing considers the use of different *Trichoderma* species to develop more effective commercial products against local phytopathogenic fungi, for the benefit of quality agriculture and pesticide-free crops.

It is necessary to promote information on the use and availability of *Trichoderma* species among farmers and to popularize their use, as well as to boost research on the management of native species in crops of agricultural and forestry interest, both *in vitro* and *in situ*. For this reason, it is necessary to support the institutions and laboratories dedicated to this field.

Also, research on the ecological effects of widespread applications of one or some *Trichoderma* species in an agricultural consortium should be expanded, in order to guarantee an effect that benefits the environment.

At present, molecular techniques are required for accurate identification, both at the species level and for the classification of isolates in the genus *Trichoderma*. However, in addition to DNA or RNA sequencing, new advances and changes that occur year after year should be taken into account.

Due to the growing number of commercial products for a great diversity of crops, as well as the finding of new strains in the geographical distribution of Mexico, it is necessary to select fungal strains for multiple use and test whether they are effective or superior as mycoparasites, whether they promote systemic plant resistance to abiotic and biotic stress, whether they promote plant growth and development to increase yields, and whether they persist in the rhizosphere and are endophytes. This information could be used to identify products that are actively sought after by agriculture

están registradas ante la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), pero algunas de ellas tienen un número limitado de grupos taxonómicos en sus compuestos activos, como *Trichoderma* spp., donde destacan *T. harzianum*, *T. virens*, *T. asperellum* y *T. gamsii* por su uso comercial agrícola en México (COFEPRIS, 2021). *T. harzianum* es la especie de control biológico más comercializada, y Sinaloa es el primer productor y comercializador (Magalhães-de Abreu & Heinrich, 2022). Los reportes sobre el control biológico de fitopatógenos a escala nacional señalan una estrecha disponibilidad de *Trichoderma* spp. como biopesticida en el control de plagas en México (Córdova-Albores et al., 2021). En el Cuadro 6 se muestran algunos productos a base de *Trichoderma* spp. disponibles en México, y en el Cuadro 7, productos a base de *Trichoderma* spp. producidos en distintos países.

Conclusiones y recomendaciones

Los efectos biológicos positivos del hongo antagonista *Trichoderma* en las plantas se han comprobado, no solo en el laboratorio, sino también en la producción de cultivos agrícolas en invernaderos. Por su eficiente actividad antimicrobiana de amplio espectro, *Trichoderma* se ha establecido como un agente de biocontrol reconocido internacionalmente. No obstante, se requieren estudios en campo para determinar las dosis y momentos de aplicación de especies de *Trichoderma* que pueden actuar de manera combinada.

De acuerdo con el análisis en esta revisión, las especies de *Trichoderma* resultan benéficas e indispensables para mantener a las plantas y el suelo en las condiciones ideales para la agricultura. En este trabajo se describen, de manera simplificada, los modos de obtener, aislar e identificar las cepas de *Trichoderma*, incluyendo los mecanismos de biocontrol relacionados con la antibiosis, el micoparasitismo, la resistencia inducida en plantas y la competencia por espacio y nutrientes.

Actualmente, existe un número creciente de reportes de especies de *Trichoderma*, los cuales evalúan su actividad antagonista y su uso como biocontrol de fitopatógenos en cultivos de importancia comercial.

En distintas regiones de México, y con el objetivo de promover una agricultura sustentable, se comercializan diversos biopreparados con base en pocas especies de *Trichoderma*, principalmente de *T. harzianum*, seguida de *T. virens*, *T. asperellum* y *T. viride*.

Es importante resaltar que con la información que se proporciona en esta revisión, sobre el biocontrol de las especies autóctonas de *Trichoderma* registradas en México, así como la descripción de acción y la disponibilidad de productos a base de *Trichoderma* spp., se puede generar interés en su uso por parte de los agricultores, así como

End of English version

References

- Abdelkhalek, A., Al-Askar, A. A., Arishi, A. A., & Behiry, S. I. (2022). *Trichoderma hamatum* strain Th23 promotes tomato growth and induces systemic resistance against tobacco mosaic virus. *Journal of Fungi*, 8(3), 228. doi: 10.3390/jof8030228
- Ab Rahman, S. F., Singh, E., Pieterse, C. M., & Schenk, P. M. (2018). Emerging microbial biocontrol strategies for plant pathogens. *Plant Science*, 267, 102-111. doi: 10.1016/j.plantsci.2017.11.012
- Acuña, W., Yalta, C., & Veli, E. (2020). Transferibilidad de marcadores microsatélites de *Anas platyrhynchos* al pato criollo peruano *Cairina moschata* doméstica. *Revista Peruana de Biología*, 27(2), 255-260. doi: 10.15381/rpb.v27i2.15015
- Acurio, R., & España, C. (2017). Aislamiento, caracterización y evaluación de *Trichoderma* spp. como promotor de crecimiento vegetal en pasturas de raygrass (*Lolium perenne*) y trébol blanco (*Trifolium repens*). *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 25(1), 3-61. doi: 10.17163/lgr.n25.2017.05
- Agamez-Ramos, E. Y., Zapata-Navarro, R. I., Oviedo-Zumaqué, L. E. & Barrera-Violeth, J. L. (2008). Evaluación de sustratos y procesos de fermentación sólida para la producción de esporas de *Trichoderma* sp. *Revista Colombiana de Biología*, 10(2), 23-34. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752008000200004
- Agro Link. (2022). TRICHODERMAXEC: biofungicide *Trichoderma asperellum* based. Novozymes Bioag Productos. Retrieved from http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons
- Agrobionsa. (2022). *Tricho-sin*[®]. Biofungicida a base de *T. harzianum* ABNTh 502. Agrobiológicos del Noroeste, S.A. de C.V. Retrieved from <https://agrobionsa.com/producto/tricho-sin>
- Agrobióticos. (2022). VALERY PLUS: Biofungicida a base de los hongos *Trichoderma viride* y *Trichoderma harzianum*. Ministerio de Agricultura. Servicio Nacional de Sanidad Agraria. Retrieved from https://servicios.senasa.gob.pe/SIGIAWeb/sigia_consulta_producto.html
- Aguilar-Benítez, G., Solís-Oba, M. M., Castro-Rivera, R., López-Gayou, V., Lara-Ávila, J. P., & Esteves-Luna, M. A. (2020). Efecto de bacterias PGPB, composta y digestato en el rendimiento de materia seca de pasto ovollo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(24), 117-127. doi: 10.29312/remexca.v0i24.2363
- Ahluwalia, V., Kumar, J., Rana, V. S., Sati, O. P., & Walia, S. (2014). Comparative evaluation of two *Trichoderma harzianum* strains for major secondary metabolite production and antifungal activity. *Natural Product Research*, 29(10), 914-920. doi: 10.1080/14786419.2014.958739
- Alfiky, A., & Weisskopf, L. (2021). Deciphering *Trichoderma*-plant-pathogen interactions for better development of biocontrol applications. *Journal of Fungi*, 7(1), 61. doi: 10.3390/jof7010061
- nuevas alternativas de investigación con directrices que contribuyan a la transferencia de conocimiento del biocontrol. Lo anterior considerando el uso de distintas especies de *Trichoderma* para elaborar productos comerciales más efectivos contra hongos fitopatógenos locales, esto en beneficio de una agricultura de calidad y de cultivos libres de pesticidas.
- Es necesario promover la información sobre el uso y la disponibilidad de las especies de *Trichoderma* entre los agricultores y hacer popular su uso, así como potenciar el estudio para el manejo de las especies autóctonas en los cultivos de interés agrícola y forestales, tanto *in vitro* como *in situ*. Por ello, es necesario apoyar a las instituciones y laboratorios que se dedican a este campo.
- También, se deben ampliar las investigaciones sobre los efectos ecológicos de las aplicaciones generalizadas de una o algunas especies de *Trichoderma* en consorcio para la agricultura, con la finalidad de garantizar un efecto que beneficie el medio ambiente.
- En la actualidad, para realizar una identificación certera, tanto a nivel de especie como para llegar a la clasificación de aislamientos en el género *Trichoderma*, se precisa de las técnicas moleculares. No obstante, además de la secuenciación del DNA o del RNA, se deben contemplar los nuevos avances y cambios que se producen año con año.
- Debido a que existe un número creciente de productos comerciales en una mayor diversidad de cultivos, así como la develación de nuevas cepas en la distribución geográfica de México, es necesario seleccionar cepas fúngicas para uso múltiple, y comprobar si son efectivas o superiores como micoparásitos, si promueven la resistencia sistémica de la planta al estrés abiótico y biótico, si promueven el crecimiento y desarrollo de plantas para aumentar los rendimientos, y si persisten en la rizosfera y son endófitas. Esta información se podría emplear para identificar los productos que son buscados activamente por la agricultura.

Fin de la versión en español

- 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(3), 1-23. doi: 10.56369/tsaes.4297
- Alves-de Aguiar, R., Gomes-da Cunha, M., & Lobo, M. (2014). Management of white mold in processing tomatoes by *Trichoderma* spp. and chemical fungicides applied by drip irrigation. *Biological Control*, 74, 1-5. doi: 10.1016/j.biocontrol.2014.03.009
- Amorim, L. L., da Fonseca-dos Santos, R., Neto, J. P., Guida-Santos, M., Crovella, S., & Benko-Iseppon, A. M. (2017). Transcription factors involved in plant resistance to

- pathogens. *Current Protein and Peptide Science*, 18(4), 335-351. doi: 10.2174/13892037176661606211 22405
- Andermatt Madumbi. (2022). *ECO-T: biofungicide and biostimulant Trichoderma asperellum based*. KwaZulu-Natal: Plant Health products. Retrieved from <http://plant-health.co.za/eco-t/>
- Aydoğdu, M., Kurbetli, İ., Kitapçı, A., & Sülü, G. (2020). Aggressiveness of green mould on cultivated mushroom (*Agaricus bisporus*) in Turkey *Journal of Plant Disease and Protection*, 127(5), 695-708. doi: 10.1007/s41348-020-00328-8
- Azul Natural. (2021). *Pro selective. Biofungicida a base de Trichoderma harzianum*. Azul Natural. Retrieved from <https://azul-natural.net/portfolio-items/pro-selective/?portfolioCat>
- Barboza-García, A., Pérez-Cordero, A., & Anaya-Chamorro, L. (2022). Especies nativas de *Trichoderma* aisladas de plantaciones de aguacate con actividad inhibitoria contra *Phytophthora cinnamomi*. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 20(2), 102-116. doi: 10.18684/rbsaa.v20.n2.2022.1852
- Barnett, H., & Hunter, B. B. (1972). *Illustrated genera of imperfect fungi*. Minnesota, USA: The American Phytopathological Society. doi: 10.2307/3757954
- Bayer. (2021). *DonJon® Biofungicida elaborado con cepas de Trichoderma asperellum y Trichoderma gamsi*. Bayer Global. Retrieved from <https://www.cropscience.bayer.es/Productos/Fungicidas/>
- Benson, D. A., Cavanaugh, M., Clark, K., Karsch-Mizrachi, I., Ostell, J., Pruitt, K. D., & Sayers E. W. (2018). GenBank Nucleic Acids Research, 46(1), 41-47. doi: 10.1093/nar/gkx1094
- Bettiol, W., Maffia, L. A., & Castro, M. L. (2014). Control biológico de enfermedades de plantas en Brasil. In: Bettiol, W., Rivera, M. C. Mondino, P., Montealegre, J. R., & Colmenárez, Y. C. (Eds), *Control biológico de enfermedades de plantas en América Latina y el Caribe* (pp. 91-137). Montevideo, Uruguay: Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Retrieved from <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1012615/1/2014LV01.pdf>
- Bhat, K. A. (2017). A new agar plate assisted slide culture technique to study mycoparasitism of *Trichoderma sp.* on *Rhizoctonia solani* and *Fusarium oxysporium*. *International Journal of Current Microbiology and Applied Science*, 6(8), 3176-3180. doi: 10.20546/ijcmas.2017.608.378
- Biokrone. (2022). *NATUCONTROL: fungicida biológico a base de Trichoderma harzianum*. Retrieved from <http://www.biokrone.com/natucontrol.php>
- Biological Solutions. (2022). *CONTEGO TR: Plant protection & Nutrition, Trichoderma viride-based*. Retrieved from http://www.biosolutions.co.nz/uploads/2/1/4/8/21483126/contego-trlabela5_print.pdf
- Biona. (2022). *FUNGISTOP: Biofertilizer and growth promoter based on Trichoderma spp.* Retrieved from <http://bionagroup.ru/plants/biofun/biologicheskij-fungitsid-fungistop/>
- Biospark Corp. (2022). *BIOSPARK: Biofertilizer and growth promoter based on Trichoderma spp.* Retrieved from <http://www.biosparkph.com/annual-product-revenue-goal>
- Brotman, Y., Landau, U., Cuadros-Inostroza, A., Takayuki, T., Fernie, A. R., Chet, I., Viterbo, A., & Willmitzer, L. (2013). *Trichoderma*-plant root colonization: Escaping early plant defense responses and activation of the antioxidant machinery for saline stress tolerance. *PLoS Pathology*, 9(3), e1003221. doi: 10.1371/journal.ppat.1003221
- Buchenaue, H., & El-Hasan, A. (2009). Actions of 6-pentyl-alpha-pyrone in controlling seedling blight incited by *Fusarium moniliforme* and inducing defence responses in maize. *Journal of Phytopathology*, 157(11-12), 697-707. doi: 10.1111/j.1439-0434.2009.01565.x
- Cai, F., & Druzhinina, I. S. (2021). In honor of John Bissett: Authoritative guidelines on molecular identification of *Trichoderma*. *Fungal Diversity*, 107, 1-69. doi: 10.1007/s13225-020-00464-4
- Calaça, F. J., Sousab, D. G., Belém-Juniorb, J. S., Faquimb, R. C., Xavier-Santosa, S., Silva-Netob, C. M., & Souzab, M. M. (2022). Perception of fungi by farmers in the Cerrado. *Brazilian Journal of Biology*, 82, e236219 doi: 10.1590/1519-6984.236219
- Caltech S.A. (2022). *HULKGREEN: Biofungicida a base de Trichoderma harzianum*. Ministerio de Producción y Trabajo. Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria. Retrieved from <https://www.argentina.gob.ar/senasa/programas-sanitarios/productos-veterinarios-fitosanitarios-yfertilizantes/registro-nacional-de-terapeutica-vegetal>
- Carreras-Villaseñor, N., Sánchez-Arreguín, J. A., & Herrera-Estrella, A. H. (2012). *Trichoderma*: sensing the environment for survival and dispersal. *Microbiology*, 158(1), 3-16. doi: 10.1099/mic.0.052688-0
- Certis. (2022). *SOILGARD: Microbial fungicide*. Retrieved from http://certisusa.com/pest_management_products/biofungicides/soilgard_12g_microbial_fungicide.htm
- Charoenrak, P., & Chamswarn, C. (2016). Efficacies of wettable pellet and fresh culture of *Trichoderma asperellum* biocontrol products in growth promoting and reducing dirty panicles of rice. *Agriculture and Natural Resources*, 50(4), 243-249. doi: 10.1016/j.anres.2016.04.001
- Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS). (2021). *Biofungicidas a base de Trichoderma para el control biológico, registrados y autorizados*. Retrieved from <https://www.gob.mx/cofepris>
- Companioni-González, B., Domínguez-Arizmendi, G., & García-Velasco, R. (2019). *Trichoderma*: su potencial en el desarrollo sostenible de la agricultura. *Biología Vegetal*, 19(4), 237-248. Retrieved from <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/639>
- Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Cortés-Penagos, C. & López-Bucio, J. (2009). *Trichoderma virens*, a plant beneficial fungus, enhances biomass production and promotes lateral root growth through an auxin-dependent mechanism in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 149(3), 1579-1592. doi: 10.1104/pp.108.130369
- Córdova-Albores, L. C., Zelaya-Molina, L. X., Ávila-Alistac, N., Valenzuela-Ruiz, V., Cortés-Martínez, N. E., Parra-Cota,

- F. I., Burgos-Canul, Y. Y., Chávez-Díaz, I. F., Fajardo-Franco, M. L., & Santos-Villalobos, S. (2021). Omics sciences potential on bioprospecting of biological control microbial agents: the case of the Mexican agrobiotechnology. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 39(1), 147-184. doi: 10.18781/R.MEX.FIT.2009-3
- Dou, K., Lu, Z., Wu, Q., Ni, M., Yu, C., Wang, M.,... Zhang, C. (2020). MIST: a multilocus identification system for *Trichoderma*. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(18), e01532-20. doi: 10.1128/AEM.01532-20
- Druzhinina, I. S., Chenthamara, K., Zhang, J., Atanasova, L., Yang, D., Miao, Y., ... Kubicek, C. P. (2018). Massive lateral transfer of genes encoding plant cell wall-degrading enzymes to the mycoparasitic fungus *Trichoderma* from its plant-associated hosts. *PLoS Genetics*, 14(4), e1007322. doi: 10.1371/journal.pgen.1007322
- Dubey, S. C., Tripathi, A., Dureja, P., & Grover, A. (2011). Characterization of secondary metabolites and enzymes produced by *Trichoderma* species and their efficacy against plant pathogenic fungi. *Indian Journal of Agricultural Research*, 81(5), 455-461.
- El Komy, M. H., Saleh, A. A., Eranthodi, A. Y., & Molan, Y. (2015). Characterization of novel *Trichoderma asperellum* isolates to select effective biocontrol agents against tomato *Fusarium* wilt. *Plant Pathology Journal*, 31(1), 50-60. doi: 10.5423/PPJ.OA.09.2014.0087
- Esparza-Reynoso, S., Ruíz-Herrera, L. F., Pelagio-Flores, R., Macías-Rodríguez, L. I., Martínez-Trujillo, M., López-Coria, M.,... López-Bucio, J. (2021). *Trichoderma atroviride* emitted volatiles improve growth of *Arabidopsis* seedlings through modulation of sucrose transport and metabolism. *Plant, Cell & Environment*, 44(6), 1961-1976. doi: 10.1111/pce.14014
- Espinosa-de los Monteros, A. (2003). Sistemática y evolución molecular: su importancia en la conservación de aves. In: Gómez-de Silva, H., & Oliveras-de Ita, A. (Eds.), *Conservación de aves experiencias en México* (pp. 290-324). México: CIPAMEX.
- Fang, H., Li, C., Zhao, J., & Zhao, C. (2021). Biotechnological advances and trends in engineering *Trichoderma reesei* towards cellulase hyperproducer. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 26, 517-528. doi: 10.1007/s12257-020-0243-y
- FARMERSTOP. (2022) *BIOHARZ: biofungicide Trichoderma harzianum based, effective control of seed & soil borne diseases*. Retrieved from <https://www.iplbiologicals.com/trichoderma-harzianum/>
- Felsenstein, J. (1985). Confidence limits on phylogenies: an approach using the bootstrap. *Evolution*, 39(4), 783-791. doi: 10.2307/2408678
- Fierro, F. F. (2014). Electroforesis de ADN. In: Cornejo-Romero, A., Serrato-Díaz, A., Rendón-Aguilar, B., & Graciela-Rocha, M. (Eds.), *Herramientas moleculares aplicadas en ecología aspectos teóricos y prácticos* (pp. 27-52). México: INECC-SEMARNAT.
- Gams, W., & Bissett, J. (1998). Morphology and identification of *Trichoderma*. In: Kubicek, C. P., & Harman, G. E. (Eds), *Trichoderma & Gliocladium. Basic biology, Taxonomy and Genetics* (pp. 3-31). London: Taylor & Francis
- GenBank. (2022). *GenBank versión 250.0 documentation*. Retrieved from <https://ftp.ncbi.nih.gov/genbank/gbrel.txt>
- Ghazanfar, M. U., Raza, M., Raza, W., & Qamar, M. I. (2018). *Trichoderma* as potential biocontrol agent, its exploitation in agriculture: a review. *Plant Protection*, 2(03), 109-135.
- Ghisalberti, E. L. (1998). Bioactive metabolites from soilborne fungi: natural fungicides and biocontrol agents. *Studies in Natural Products Chemistry*, 21, 181-250. doi: 10.1016/S1572-5995(00)80007-1
- González, H. (2014). Specialization on a global scale and agri-food vulnerability: 30 years of export agriculture in Mexico. *Development Studies Research. An Open Access Journal*, 1(1), 295-310. doi: 10.1080/21665095.2014.929973
- Gregory, T. R. (2008). Understanding evolutionary trees. *Evolution, Education and Outreach*, 1(2), 121-137. doi: 10.1007/s12052-008-0035-x
- Gruindag International. (2022). *AGRODERMA: biofungicide Trichoderma harzianum based*. Retrieved from <https://gruindag.com/en/product/agroderma-mexico-2/>
- Guigón-López, C., Guerrero-Prieto, V., Vargas-Albore, F., Carvajal-Millán, E., ... Ávila-Quezada, G. D. (2010). Identificación molecular de cepas nativas de *Trichoderma* spp. su tasa de crecimiento in vitro y antagonismo contra hongos fitopatógenos. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 28(2), 87-96.
- Gu, X., Wang, R., Sun, Q., Wu, B., & Sun, J. Z. (2020). Four new species of *Trichoderma* in the *harzianum* clade from northern China. *MycKeys*, 73, 109-132. doi: 10.3897/mycokeys.73.51424
- Guzmán-Guzmán, P., Kumar, A., de los Santos-Villalobos, S., Parra-Cota, F. I., Orozco-Mosqueda, M. C., Fadji, A. E., ... Hyder, S. (2023). *Trichoderma* species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases - a review. *Plants*, 12(3), 432. doi: 10.3390/plants12030432
- Haas, D., & Défago, G. (2005). Biological control of soil-borne pathogens by *Pseudomonas fluorescens*. *Nature Reviews Microbiology*, 3(4), 307-319. doi: 10.1038/nrmicro1129
- Hagn, A., Pritsch, K., Schloter, M., & Munch, J. C. (2003). Fungal diversity in agricultural soil under different farming management systems, with special reference to biocontrol strains of *Trichoderma* spp. *Biology and Fertility of Soils*, 38(4), 236-244. doi: 10.1007/s00374-003-0651-0
- Hajek, A. E., & Eilenberg, J. (2018). *Natural enemies: an introduction to biological control*. New York USA: Cambridge University Press. Retrieved from https://events.cornell.edu/event/natural_enemies
- Hall, T. A. (1999). BioEdit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. *Nucleic Acids Symposium Series*, 41, 95-98.

- Hao, D., Lang, B., Wang, Y., Wang, X., Liu, T., & Chen, J. (2022). Designing synthetic consortia of *Trichoderma* strains that improve antagonistic activities against pathogens and cucumber seedling growth. *Microbial Cell Factories*, 21(1), 1-17. doi: 10.1186/s12934-022-01959-2
- Harwoko, H., Daletos, G., Stuhldreier, F., Lee, J., Wesselborg, S., ... Feldbrügge, M. (2021). Dithiodiketopiperazine derivatives from endophytic fungi *Trichoderma harzianum* and *Epicoccum nigrum*. *Natural Product Research*, 35(2), 257-265. doi: 10.1080/14786419.2019.1627348
- He, C., Liu, C., Liu, H., Wang, W., Hou, J., & Li, X. (2022). Dual inoculation of dark septate endophytes and *Trichoderma viride* drives plant performance and rhizosphere microbiome adaptations of *astragalus mongholicus* to drought. *Environmental Microbiology*, 24(1), 324-340. doi: 10.1111/1462-2920.15878
- Heidari, F., & Olia, M. (2016). Biological control of root-knot nematode, *Meloidogyne javanica*, using vermicompost and fungus *Trichoderma harzianum* on tomato. *Iranian Journal of Plant Pathology*, 52(1), 109-124.
- Hermosa, R., Viterbo, A., Chet, I., & Monte, E. (2012). Plant-beneficial effects of *Trichoderma* and of its genes. *Microbiology*, 158(1), 17-25. doi: 10.1099/mic.0.052274-0
- Hernández-Domínguez, C., Vázquez-Benito, J. A., Vázquez-Moreno, F., Berdeja-Arbeu, R., Morales-Fernández, S. D., & Reyes-López, D. (2019). Abundancia y diversidad genética de *Fusarium oxysporum* y *Trichoderma* sp. en *musa* AAB. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(8), 1783-1796. doi: 10.29312/remexca.v10i8.1831
- Hjeljord, L., Tronsmo, A., Harman, G. E., & Kubicek, C. P. (1998). *Trichoderma* and *Gliocladium*. biological control: an overview. In: Harman, G. E., & Kubicek, C. P. (Eds), *Trichoderma & Gliocladium: enzymes, biological control and commercial applications* (pp. 131-151). New York, USA: Taylor & Francis.
- Howell, C. R. (2003). Mechanisms employed by *Trichoderma* species in the biological control of plant diseases: the history and evolution of current concepts. *Plant Disease*, 87(1), 4-10. doi: 10.1094/PDIS.2003.87.1.4
- Igiehon, N. O., & Babalola, O. O. (2018). Rhizosphere microbiome modulators: contributions of nitrogen fixing bacteria towards sustainable agriculture. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4), 574. doi: 10.3390/ijerph15040574
- Infante, D., Martínez, B., González, N., & Reyes, Y. (2009). Mecanismos de acción de *Trichoderma* frente a hongos fitopatógenos artículo reseña. *Revista Protección Vegetal*, 24(1), 14-21. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-27522009000100002
- Innovación Agrícola. (2022). *BIOBEN: fungicida biológico a base de Trichoderma harzianum*. Altiara, Agrícola Innovación S.A. de C.V. Retrieved from <https://altiara.mx/producto/bioben/>
- Jayaswal, R. K., Singh, R., & Lee, Y. S. (2003). Influence of physiological and environmental factors on growth and sporulation of an antagonistic strain of *Trichoderma viride* RSR 7. *Mycobiology*, 31(1), 36-41. doi: 10.4489/MYCO.2003.31.1.036
- Ji, Z., L., Ma, D. S., & Miao, F. P. (2014). Chemical constituents from *Trichoderma longibrachiatum*, an endophytic fungus derived from marine green alga *Codium fragile*. *Journal of Shenyang University*, 4, 277-280.
- Karthikeyan, B. C., Jaleel, A., Lakshmanan, G. A., & Deiveekasundaram, M. (2008). Studies on rhizosphere microbial diversity of some commercially important medicinal plants. *colloids and surfaces B. Biointerfaces*, 62(1), 143-145. doi: 10.1016/j.colsurfb.2007.09.004
- Kerekes, A. D., & Wipf, P. (2003). Structure reassignment of the fungal metabolite TAEMC161 as the phytotoxin viridiol. *Journal of Natural Products*, 66(5), 716-718. doi: 10.1021/np0300277
- Kerroum, F., Nouredine, K., Henni, J. E., & Mabrouk, K. (2015). Antagonistic effect of *Trichoderma harzianum* against *Phytophthora infestans* in the North-west of Algeria. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 6(4), 44-53.
- Khan, R. A., Najeeb, S., Hussain, S., Xie, B., & Li, Y. (2020). Bioactive secondary metabolites from *Trichoderma* spp. against phytopathogenic Fungi. *Microorganisms*, 8(6), 817. doi: 10.3390/microorganisms8060817
- Kong, Z. Y., Jing, R., Wu, Y. B., Guo, Y. L., Geng, Y. Y., Ji, J. C., Qin, L. P., & Zheng, C. J. (2018). Trichodermadiones A and B from the solid culture of *Trichoderma atroviride* S361, an endophytic fungus in *Cephalotaxus fortunei*. *Fitoterapia*, 127, 362-366. doi: 10.1016/j.fitote.2018.04.004
- Koppert. (2021). *Trianum-P. Fungicida biológico a base de Trichoderma harzianum T-22*. Retrieved from <https://www.koppert.mx/trianum-p/>
- Kumar, R., Kumari, K., Hembram, K. C., Kandha, L., & Bindhani, B. K. (2019). Expression of an endo α -1, 3-glucanase gene from *Trichoderma harzianum* in rice induces resistance against sheath blight. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 28, 84-90. doi: 10.1007/s13562-018-0465-7
- Kumiai Chemical Industry. (2022). *ECOHOPE: biofungicida Trichoderma atroviride based*. Agricultural chemicals. Retrieved from <https://www.kumiai-chem.co.jp/english/products/index.html>
- Küpper, V., Steiner, U., & Kortekamp, A. (2022). *Trichoderma* species isolated from grapevine with tolerance towards common copper fungicides used in viticulture for plant protection. *Pest Management Science*, 78(8), 3266-3276. doi: 10.1002/ps.6951
- Lang, B. Y., Li, J., Zhou, X. X., Chen, Y. H., Yang, Y. H., Li, X. N., Zeng, Y., & Zhao, P. J. (2015). Koninginins L and M, two polyketides from *Trichoderma koningii* 8662. *Phytochemistry Letters*, 11, 1-4. doi: 10.1016/j.phytol.2014.10.031
- Lázaro-Silva, D. N., de Mattos, J. C., Castro, H. C., Alves, G., & Amorim, L. M. (2015). The Use of DNA extraction

- for molecular biology and biotechnology training: a practical and alternative approach. *Creative Education*, 6, 762-772. doi: 10.4236/ce.2015.68079
- Li Destri-Nicosia, M. G., Mosca, S., Mercurio, R., & Schena, L. (2015). Dieback of *Pinus nigra* seedlings caused by a strain of *Trichoderma viride*. *Plant Disease*, 99(1), 44-49. doi: 10.1094/pdis-04-14-0433-re
- Li, M. F., Li, G. H., & Zhang, K. Q. (2019). Non-volatile metabolites from *Trichoderma* spp. *Metabolites*, 9(3), 58. doi: 10.3390/metabo9030058
- Lila Agrotech. (2022). *ASTHA TV: Biofungicide Trichoderma viride-based*. Lila Agrotech. Retrieved from <http://www.lilaagrotech.com/product/astha-tv-trichoderma-viride/>
- López, J., Pelagio, R., & Herrera, A. (2015). *Trichoderma* as bio stimulant: exploiting the multilevel properties of a plant beneficial fungus. *Scientia Horticultura*, 196, 109-123. doi: 10.1016/j.scienta.2015.08.043
- López-López, M. E., del Toro-Sánchez, C. L., Ochoa-Ascencio, S., Aguilar-López, J. A., Cruz, O. M., Madrigal-Pulido, J. A., ... Gutiérrez-Lomelí, M. (2023). Antagonismo de cepas de *Trichoderma* spp. aisladas en *Tanaxuri*, Michoacán, México contra patógenos del aguacate (*Persea americana* Mill). *Biocencia*, 25(1), 24-33. doi: 10.18633/biocencia.v25i1.1726
- McMullin, D. R., Renaud, J. B., Barasubiye, T., Sumarah, M. W., & David, M. J. (2017). Metabolites of *Trichoderma* species isolated from damp building materials. *Canadian Journal of Microbiology*, 63(7), 621-632. doi: 10.1139/cjm-2017-0083
- Magalhães-de Abreu L., & Heinrich, L. (2022). El género *Trichoderma*. In: Conrado-Meyer, M., Mazaro, S., & Cesara-Silva, J. (Eds), *Trichoderma su uso en la agricultura*. (pp. 165-181). Brasília, Brazil: Embrapa.
- Malmierca, M. G., Barua, J., McCormick, S. P., Izquierdo-Bueno, I., Cardoza, R. E., Alexander, N. J., ... Gutiérrez, S. (2015). Novel aspinolide production by *Trichoderma arundinaceum* with a potential role in Botrytis cinerea antagonistic activity and plant defence priming. *Environmental Microbiology*, 17(4), 1103-1118. doi: 10.1111/1462-2920.12514
- Maniscalco, D. P., & Dorta, B. (2015). Diversidad del hongo *Trichoderma* spp. en plantaciones de maíz de Venezuela. *Interciencia*, 40(1), 23-31. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33933115004>
- Márquez-Valdelamar, L. M., Serrato-Díaz, A., & Cerritos-Flores, R. (2008). Secuenciación de fragmentos de ADN. In: Cornejo-Romero, A., Serrato-Díaz, A., Rendón-Aguilar, B., & Rocha, M. G. (Eds), *Herramientas moleculares aplicadas en ecología aspectos teóricos y prácticos* (pp. 232-249). México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved from chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/[https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/770DBBBD5ADF759505257D4900580FE6/\\$FI](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/770DBBBD5ADF759505257D4900580FE6/$FI)
- LE/HerramientasMolecularesAplicadasEcolog%C3%A Da.pdf
- Martínez, B., Reyes, Y., Infante, D., González, E., Baños, H., & Cruz, A. (2008). Selección de aislamientos de *Trichoderma* spp. candidatos a biofungicidas para el control de *Rhizoctonia* sp. en arroz. *Revista Protección Vegetal*, 23(2), 118-125.
- Martínez, B., Infante, D. R., & Reyes, Y. (2013). *Trichoderma* spp. y su función en el control de plagas en los cultivos. *Revista Protección Vegetal*, 28(1), 1-11.
- Mas, E., Poza, J., Ciriza, J., Zaragoza, P., Osta, R., & Rodellar, C. (2016). Fundamento de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR). *Revista AquaTI*, 15, 1-10. Retrieved from <http://www.revistaaquatic.com/ojs/index.php/aquatic/article/view/139/128>
- Masi, M., Nocera, P., Reveglia, P., Cimmino, A., & Evidente, A. (2018). Fungal metabolites antagonists towards plant pests and human pathogens: structure-activity relationship studies. *Molecules*, 23(4). doi: 10.3390/molecules23040834
- Matas-Baca, M. A., Urías, G. C., Pérez-Álvarez, S., Flores-Córdova, M. A., Escobedo-Bonilla, C. M., Magallanes-Tapia, M. A., & Sánchez, C. E. (2022). Morphological and molecular characterization of a new autochthonous *Trichoderma* sp. isolate and its biocontrol efficacy against *Alternaria* sp. *Saudi Journal of Biological Science*, 29, 2620-2625. doi: 10.1016/j.sjbs.2021.12.052
- Mendoza, R. B., & Espinoza, A. (2017). *Guía técnica para muestreo de suelos*. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria y Catholic Relief Services. Retrieved from <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- Meng, X., Miao, Y., Liu, Q., Ma, L., Guo, K., Liu, D., & Ran, W. (2019). TgSWO from *Trichoderma guizhouense* NJAU4742 promotes growth in cucumber plants by modifying the root morphology and the cell wall architecture. *Microbiology Cell Factories*, 18(1), 148. doi: 10.1186/s12934-019-1196-8
- Meng, J. J., Cheng, W., Heydari, H., Wang, B., Zhu, K., Konuklugil, B., & Lin, W. H. (2018). Sorbicillinoid-based metabolites from a sponge-derived fungus *Trichoderma saturnisporum*. *Marine Drugs*, 16(7), 226. doi: 10.3390/md16070226
- Mesa-Vanegas, A. M., Marín, A., & Calle-Osorno, J. (2019). Metabolitos secundarios en *Trichoderma* spp. y sus aplicaciones biotecnológicas agrícolas. *Actualidades Biológicas*, 41(111), 32-44. doi: 10.17533/udea.acbi.v41n111a02
- Miller, J., & Johnson, D. (2000). Competitive fitness of *Phytophthora infestans* isolates under semiarid field conditions. *Phytopathology*, 90(3), 220-227. doi: 10.1094/PHYTO.2000.90.3.220
- Morales, E. M., Lino, M. D., Ortega, E., & Castellanos, P. L. (2020). Evaluación de la capacidad antagónica in vitro de cepas de *Trichoderma* spp frente a *Phytophthora cinnamomi*, fitopatógeno de *Persea americana* (Palta).

- Ciencia e Investigación, 23(1), 65-70. doi: 10.15381/ci.v23i1.18754
- Moritz, C., & Hillis, D. M. (1996). Molecular systematics: context and controversies. In: Hillis, D. M., Moritz, C., & Mable, B. K. (Eds.), *Molecular systematics* (pp. 1-12). Sunderland, Massachusetts, USA: Sinauer Associates Inc.
- Mostafalou, S., & Abdollahi, M. (2017). Pesticides: an update of human exposure and toxicity. *Archives of Toxicology*, 91(2), 549-599. doi: 10.1007/s00204-016-1849-x
- Mukhopadhyay, R., & Kumar, D. (2020) *Trichoderma*: a beneficial antifungal agent and insights into Its mechanism of biocontrol potential. *Egypt Journal of Biological Pest Control*, 30(1), 1-8. doi: 10.1186/s41938-020-00333-x
- Nascimento, V. C., Rodrigues-Santos, K. C., Carvalho-Alencar, K. L., Castro, M. B., Kruger, R. H., & Lopes, F. A. C. (2022). Trichoderma: Biological control efficiency and perspectives for the Brazilian Midwest states and Tocantins. *Brazilian Journal of Biology*, 82, e260161. doi: 10.1590/1519-6984.260161
- National Center for Biotechnology Information (NCBI). (2021). *Biomedical and genomic information*. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>
- Nutri-Tech Solutions. (2022) *NUTRI-LIFE TRICHO_SHIELDTM: Growth promoter based on Trichoderma harzianum, T. lignorum and T. koningii*. Nutri-Tech Solutions. Retrieved from <http://www.nutri-tech.com.au/factsheets/trichoshield.pdf>
- Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). (2021). *Perspectivas Agrícolas*. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- P.L.A. Biológico. (2022) *BIO-TRICHO. biofungicide Trichoderma harzianum based*. P.L.A. Agro-organics. Retrieved from <http://www.agro-organics.co.za/bio-tricho>
- Patron, N. J., Waller, R. F., Cozijnsen, A. J., Straney, D. C., Gardiner, D. M., Nierman, W. C., & Howlett, B. J. (2007). Origin and distribution of epipolythiodioxopiperazine (ETP) gene clusters in filamentous ascomycetes. *BMC Evolutionary Biology*, 7, 174. doi: 10.1186/1471-2148-7-174
- PHCa. (2021). *RootShield Plus®. Fungicida biológico preventivo para el control de enfermedades a base de los hongos Trichoderma harzianum y Trichoderma virens*. PHC® Plant Health Care. Retrieved from <http://www.phcmexico.com.mx/pdfs/biopesticidas/RootShield%20Plus.pdf>
- PHCb. (2021). *Phc T22®. Fungicida biológico a base del cruce de dos cepas de Trichoderma harzianum de regiones con contrastantes de climas y suelos*. PHC® Plant Health Care. Retrieved from <http://www.phcmexico.com.mx/pdfs/biopesticidas/T-22.pdf>
- Pineda-Insuasti, J. A., Benavides-Sotelo, E. N., Duarte-Trujillo, A. S., Burgos-Rada, C. A., ... Soto-Arroyave, C. P. (2017). Producción de biopreparados de *Trichoderma* spp: una revisión. *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*, 51(1), 47-52. Retrieved from <chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/2231/223153894008.pdf>
- Pinturas Renner Biotechnologies. (2022). 3 TAEX: *Biofungicida basado en los hongos Trichoderma viride, T. harzianum y T. longibrachiatum*. Ministerio de Agricultura. Servicio Agrícola y Ganadero. Retrieved from www.sag.gob.cl/content/lista-de-plaguicidas-autorizados-0
- Probiotec. (2022). *TRICODAMP: Biofungicida basado en Trichoderma spp*. Retrieved from <http://www.probiotec.org/index.php/tricodamp>
- PTI. (2022). *Spectrum Trico-Bio. Fungicida biológico elaborado a base de Trichoderma harzianum*. Promotora Técnica Industrial S.A. de C.V, del Grupo Ultraquimia. Retrieved from <https://www.ptisa.com.mx/>
- Qi, W., & Zhao, L. (2012). Study of the siderophore-producing *Trichoderma asperellum* Q1 on cucumber growth promotion under salt stress. *Journal Basic Microbiology*, 53(4), 355-64. doi: 10.1002/jobm.201200031
- Quimia. (2022). *Funqui Q07®. Biofungicida a base de Trichoderma viride. Q07* Quimia. Retrieved from <https://quimia.com.mx/productos/agrobiologicos/>
- Rajendrakumar, P., Sujatha, K., Rao, K. S., Kumar, N. P., Viraktamath, B. C., Balachandran, S. M., Biswal, A. K., & Sundaram, R. M., (2006). A protocol for isolation of DNA suitable for rapid seed and grain purity assessments in rice. *Rice Genetics Newsletter*, 23, 92-95.
- Rajesh, R. W., Rahul, M. S., & Ambalal, N. S. (2016). *Trichoderma*: a significant fungus for agriculture and environment. *African Journal of Agricultural Research*, 11(22), 1952-1965. doi: 10.5897/AJAR2015.10584
- Ramachander-Turaga, V. N. (2020). Peptaibols: Antimicrobial peptides from fungi. In: Singh, J., Meshram, V., & Gupta, M. (Eds), *Bioactive Natural products in Drug Discovery*. Singapore: Springer. doi: 10.1007/978-981-15-1394-7_26
- Rambaut, A. (2016). *Software FigTree ver. 1.4.3*. Retrieved from <http://tree.bio.ed.ac.uk/software/figtree>
- Reino, J. L., Guerrero, R. F., Hernández-Galán, R., & Collado, I. G. (2008). Secondary metabolites from species of the biocontrol agent *Trichoderma*. *Phytochemistry Reviews*, 7(1), 89-123. doi: 10.1007/s11101-006-9032-2
- Ren, P. J., Yang, Y., Liu, D., Wein, C., Procksh, P., Shao, B., & Lin, W. (2013). Sequential determination of new peptaibols asperelines G-Z produced by marine – derived fungus *Trichoderma asperellum* using ultrahigh pressure liquid chromatography combined with electrospray-ionization tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1309, 90-95. doi: 10.1016/j.chroma.2013.08.026
- Rendón-Macías, M. E., Riojas-Garza, A., Contreras-Estrada, D., & Martínez-Ezquerro, J. D. (2018). Análisis bayesiano. Conceptos básicos y prácticos para su interpretación y uso. *Revista Alergia México*, 65(3), 285-298. doi: 10.29262/ram.v65i3.512

- Risoli, S., Cotrozzi, L., Sarrocco, S., Nuzzaci, M., Pellegrini, E., & Vitti, A. (2022). *Trichoderma*-induced resistance to *Botrytis cinerea* in *Solanum* species: a metanalysis. *Plants*, 11(2), 180. doi: 10.3390/plants11020180
- Rodríguez, P.A., Rothballer, M., Chowdhury, S.P., Nussbaumer, T., Gutjahr, C., & Falter-Braun, P. (2019). Systems biology of plant-microbiome interactions. *Molecular Plant*, 12(6), 804-821. doi: 10.1016/j.molp.2019.05.006
- Romero-Arenas, O., Huato, M. A., Trevintilde, I. H., Lezama, J. P., García, A. A., & Arellano, A. D. V. (2012). Effect of pH on growth of the mycelium of *Trichoderma viride* and *Pleurotus ostreatus* in solid cultivation mediums. *African Journal of Agricultural Research*, 7(34), 4724-4730. Retrieved from <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-abstract/1787E2F33702>
- Russell IPM. (2022). LYCOMAX: *Trichoderma harzianum*-based novel formulations: potential applications for management of next-gen agricultural challenges.
- Sagana Agrobiológicos. (2022). BIOTRICHHO-H: fungicida biológico, polvo humectante a base de *Trichoderma harzianum*. Sagana Agrobiológicos. Retrieved from <http://saganaagrobiologicos.com/productos/>
- Saitou, N., & Nei, M. (1987). The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology and Evolution*, 4(4), 406-425. doi: 10.1093/oxfordjournals.molbev.a040454
- Samuels, G. J., & Hebbard, P. K. (2015). *Trichoderma: Identification and agricultural applications*. St. Paul, Minnesota, USA: APS Press, The American Phytopathological Society.
- Samuels, G. J., & Ismaiel, A. (2011). *Hypocrea peltata*: a mycological Dr. Jeckyll and Mr. Hyde? *Mycologia*, 103, 616-630. doi: 10.3852/10-227
- Sandle, T. (2014). *Trichoderma*. In: Batt, C. A., & Tortorello, M. L. (Eds.), *Encyclopedia of Food Microbiology* (pp. 644-646). London, UK: Academic Press.
- Sarandón, S. J., & Flores, C. C. (2014). Bases conceptuales de la agroecología y agricultura sustentable. In: Sarandón, S. J., & Flores, C. C. (Eds), *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables* (pp. 13-70). Buenos Aires, Argentina: Editorial de la Universidad de La Plata.
- Saravanakumar, K., Mandava, S., Chellia, R., Jeevithan, E., Yelamanchi, R. S., Mandava, D., ... Wang, M. H. (2019). Novel metabolites from *Trichoderma atroviride* against human prostate cancer cells and their inhibitory effect on *Helicobacter pylori* and *Shigella* toxin producing *Escherichia coli*. *Microbial Pathogenesis*, 126, 19-26. doi: 10.1016/j.micpath.2018.10.011
- Sarhy-Bagnon, V., Lozano, P., Saucedo-Castañeda, G., & Roussos, S. (2000). Production of 6-pentyl- α -pyrone by *Trichoderma harzianum* in liquid and solid-state cultures. *Process Biochemistry*, 36(1-2), 103-109. doi: 10.1016/S0032-9592(00)00184-9
- Sarwar, M. (2015). The killer chemicals as controller of agriculture insect pests: The conventional insecticides. *International Journal of Chemical and Biomolecular Science*, 1(3), 141-147.
- Sadeghian, S. K. (2018). *Interpretación de los resultados de análisis de suelo*. Avances Técnicos, (pag. 497). Retrieved from https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/avances_tecnicos/avance_tecnico_0497
- Sharma, V., Salwan, R., & Sharma, P. N. (2017). The comparative mechanistic aspects of *Trichoderma* and probiotics: scope for future research. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 100, 84-96. doi: 10.1016/j.pmpp.2017.07.005
- Singh, A., Shahid, M., Srivastava, M., Pandey, S., Sharma, A., & Kumar, V. (2014). Optimal physical parameters for growth of *Trichoderma* species at varying pH, temperature and agitation. *Virology & Mycology*, 3(1), 1-7. doi: 10.4172/2161-0517.1000127
- Sood, M., Kapoor, D., Kumar, V., Sheteiwy, M. S., Ramakrishnan, M., Landi, M., ... Sharma, A. (2020). *Trichoderma*: The "secrets" of a multitasking biocontrol agent. *Plants*, 9(6), 762. doi: 10.3390/plants9060762
- Song, Y. P., Miao, F. P., Fang, S. T., Yin, X. L., & Ji, N. Y. (2018). Halogenated and nonhalogenated metabolites from the marine-alga-endophytic fungus *Trichoderma asperellum* cf44-2. *Marine Drugs*, 16(8), 266. doi: 10.3390/md16080266
- Steyaert, J. M., Weld, R. J., Loguercio, L. L., & Stewart, A. (2010). Rhythmic conidiation in the blue-light fungus *Trichoderma pleuroticola*. *Fungal Biology*, 114(2-3), 219-223. doi: 10.1016/j.funbio.2010.01.001
- Storck, V., Karpouzias, D. G., & Martin-Laurent, F. (2017). Towards a better pesticide policy for the European Union. *Science of the Total Environment*, 575, 1027-1033. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.167
- Stringlis, I. A., Zhang, H., Pieterse, C. M., Bolton, M. D., & Jonge, R. (2018). Microbial small molecules weapons of plant subversion. *Natural Product Reports*, 35(5), 410-433 doi: 10.1039/C7NP00062F
- Suntornsuk, L. (2002). Capillary electrophoresis of phytochemical substances. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 27(5), 679-698. doi: 10.1016/S0731-7085(01)00531-3
- Swofford, D. L. (1998). *PAUP*. Phylogenetic analysis using parsimony (*and other methods)*. Massachusetts, USA: Sinauer Associates.
- Thompson, J. D., Higgins, D. G., & Gibson, T. J. (1994). ClustalW: improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position specific gap penalties and weight matrix choice. *Nucleic Acids Research*, 22(22), 4673-4680. doi: 10.1093/nar/22.22.4673
- Timac Agro. (2022). *Tusal. Fungicida biológico formulado con Trichoderma atroviride T-11 y Trichoderma asperellum T-25*. Grupo Timac Agro. Retrieved from <https://es.timacagro.com/soluciones/?prod=9420&aff=4&n=TUSAL>
- Tomás-Barberán, F. A. (1995). Capillary electrophoresis: A new technique in the analysis of plant secondary metabolites. *Phytochemical Analysis*, 6(4), 177-192. doi: 10.1002/pca.2800060402

- Torres-de la Cruz, M., Ortiz-García, C. F., Bautista-Muñoz, C., Ramírez-Pool, J. A., Ávalos-Contreras, N., Cappello-García, S., & la Cruz-Pérez, D. (2015.) Diversidad de *Trichoderma* en el agroecosistema cacao del estado de Tabasco, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 86(4), 947-961. doi: 10.1016/j.rmb.2015.07.012
- Tsai, C. C., Tzeng, D. S., & Hsieh, S. P. (2008). Biological characteristics of biocontrol effective *Trichoderma* TA and PT103 strains isolated from rhizosphere of *Anoectochilus formosanus* Hayata. *Plant Pathology Bulletin*, 17(2), 127-142.
- Umaña-Castro, J., Orozco-Cayasso, S., Umaña-Castro, R., & Molina-Bravo, R. (2019). Identificación molecular y características fisiológicas de aislamientos de *Trichoderma* para el biocontrol de dos patógenos en la piña. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(1), 125-142. doi: 10.15359/rca.53-1.7
- Vázquez, M. B., Barrera, V., & Bianchinotti, V. (2015). Molecular identification of three isolates of *Trichoderma harzianum* isolated from agricultural soils in Argentina and their abilities to detoxify in vitro metsulfuron methyl. *Botany*, 93(11), 793-800. doi: 10.1139/cjb-2015-0085
- Versa. (2021). *Labrador®. Biofungicida a base del hongo Trichoderma harzianum*. Grupo Versa. Retrieved from <http://www.grupoversa.com/ver-producto?q=70>
- Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E. L., Marra, R., Woo, S. L., & Lorito, M. (2009). Trichoderma-plant-pathogen interactions. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(1), 1-10. doi: 10.1016/j.soilbio.2007.07.002
- Vinale, F., Marra, R., Scala, F., Ghisalberti, E. L., Lorito, M., & Sivasithamparam, K. (2006). Major secondary metabolites produced by two commercial *Trichoderma* strains active against different phytopathogens. *Letters in Applied Microbiology*, 43(2), 143-148. doi: 10.1111/j.1472-765X.2006.01939.x
- Vulgarin-Martínez, L. O. (2006). Cloranfenicol: un aliado olvidado, revisión bibliográfica. *Medicina*, 11(3), 237-243.
- Waghunde, R. R., Shelake, R. M., & Sabalpara, A. N. (2016). *Trichoderma*: A significant fungus for agriculture and environment. *African Journal of Agricultural Research*, 11(22), 1952-1965. doi: 10.5897/AJAR2015.10584
- Wang, K. L., Li, C. H., & Ecker, J. R. (2002). Ethylene biosynthesis and signaling networks. *The plant cell*, 14(1), 131-151. doi: 10.1105/tpc.001768
- White, T. J., Bruns, T., Lee, S., & Taylor, J. (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis, M. A., Gelfand, D. H., Sninsky, J. J., & White, T. J. (Eds.), *PCR protocols: A guide to methods and applications* (pp. 315-322). New York, USA: Academic Press, Inc. doi: 10.1016/B978-0-12-372180-8.50042-1
- Woo, S. L., Ruocco, M., Vinale, F., Nigro, M., Marra, R., Lombardi, N., & Lorito, M. (2014). *Trichoderma*-based products and their widespread use in agriculture. *The Open Mycology Journal*, 8(1), 71-126. doi: 10.2174/1874437001408010071
- Wu, T., Yu, C., Li, R., & Li, J. (2018). Minireview: Recent advances in the determination of flavonoids by capillary electrophoresis. *Instrumentation Science & Technology*, 46(4), 364-386. doi: 10.1080/10739149.2017.1394877
- Xu, J. (2016). Fungal DNA barcoding. *Genome*, 11, 913-932. doi: 10.1139/gen2016-0046
- Xue, A. G., Guo, W., Chen, Y., Siddiqui, I., Marchand, G., Liu, J., & Ren, C. (2017). Effect of seed treatment with novel strains of *Trichoderma* spp. on establishment and yield of spring wheat. *Journal Crop Protection*, 96, 97-102. doi: 10.1016/j.cropro.2017.02.003
- Yang, Y., Yu, S., Tan, Y., Liu, N., & Wu, A. (2017). Individual and combined cytotoxic effects of co-occurring deoxynivalenol family mycotoxins on human gastric epithelial cells. *Toxins*, 9(3), 1-10. doi: 10.3390/toxins9030096
- Yedidia, I., Benhamou, N., & Chet, I. (1999). Induction of defense responses in cucumber plants (*Cucumis sativus* L.) by the biocontrol agent *Trichoderma harzianum*. *Applied and environmental microbiology*, 65(3), 1061-1070. doi: 10.1128/AEM.65.3.1061-1070.1999
- Yoshioka, Y., Ichikawa, H., Naznin, H. A., Kogure, A., & Hyakumachi, M. (2012). Systemic resistance induced in *Arabidopsis thaliana* by *Trichoderma asperellum* SKT-1, a microbial pesticide of seedborne diseases of rice. *Pest Management Science*, 68(1), 60-66. doi: 10.1002/ps.2220
- Zeilinger, S., Gruber, S., Bansal, R., & Mukherjee, P. K. (2016). Secondary metabolism in *Trichoderma*-chemistry meets genomics. *Fungal Biology Reviews*, 30(2), 74-90. doi: 10.1016/j.fbr.2016.05.001
- Zhang, Y. J., Zhang, S., Liu, X. Z., Wen, H. A., & Wang, M. (2010). A simple method of genomic DNA extraction suitable for analysis of bulk fungal strains. *Letters in Applied Microbiology*, 51(1), 114-118. doi: 10.1111/j.1472-765X.2010.02867.x
- Zhang, L., & Zhang, J. Z. (2015). Isolation and purification of active compound from *Trichoderma viridescens* and its inhibitory activities against phytopathogens. *Scientia Agricultura Sinica*, 48, 882-888.
- Zhang, J. L., Tang, W. L., Huang, Q. R., Li, Y. Z., Wei, M. L., Jiang, L. L., ... Zhang, X. X. (2021). *Trichoderma*: a treasure house of structurally diverse secondary metabolites with medicinal importance. *Frontiers in Microbiology*, 12, 723828. doi: 10.3389/fmicb.2021.723828